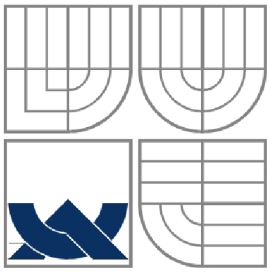
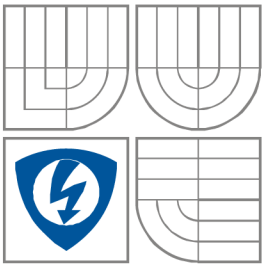


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

VÍCEPARAMETROVÝ REGULÁTOR OBĚHOVÉHO ČERPADLA

MULTIPARAMETER CIRCULATING PUMP DRIVER

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE — Bc. Zbyněk Pazour
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO, 2010

VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Bc. Zbyněk Pazour
Ročník: 2

ID: 83377
Akademický rok: 2009/10

NÁZEV TÉMATU:

Víceparametrový regulátor oběhového čerpadla

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s principy regulace fyzikálních veličin. Zaměřte se především na PID regulaci. Navrhněte koncepční řešení regulace oběhového čerpadla v solárním systému vytápění. Zvažte možnost použití mikropočítače jako řídící regulační prvek. Navrhněte obvodové řešení a v případě využití mikropočítače i implementovaný řídící algoritmus. Zrealizujte návrh a ověřte jeho funkčnost. Zaměřte se především na dynamické aspekty regulační smyčky a proveďte analýzu vlivu připojeného systému na setrvačnost regulačního zásahu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] SAVANT, C.J. Feedback control and systems. New York: McGraw-Hill, 1995. 418 s. ISBN 00-7017-052-5

[2] PINKER, J. Mikroprocesory a mikropočítače. Praha: BEN - technická literatura, 2004. 160 s. ISBN 80-7300-110-1

[3] THEMESSL, A., WEISS, W. Solární systémy. Praha: Grada, 2005. 120 s. ISBN 80-247-0589-3

Termín zadání: 8.2.2010 ***Termín odevzdání:*** 21.5.2010

Vedoucí práce: doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.
Konzultanti diplomové práce: Ing. Bohdan Růžička

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:
Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

LICENČNÍ SMLOUVA
POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Bc. Zbyněk Pazour

Bytem: Dolní 44, Nové Veselí, 592 14

Narozen/a (datum a místo): 7. září 1984 v Novém Městě na Moravě

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

se sídlem Údolní 53, Brno, 602 00

jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida, předseda rady oboru Elektronika a sdělovací technika

(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1

Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

   ☐ disertační práce

   ☒ diplomová práce

   ☐ bakalářská práce

   ☐ jiná práce, jejíž druh je specifikován jako ..... (dále jen VŠKP nebo dílo)

   Název VŠKP: Víceparametrový regulátor oběhového čerpadla

   Vedoucí/ školitel VŠKP: doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.

   Ústav: Ústav radioelektroniky

   Datum obhajoby VŠKP: _____

   VŠKP odevzdal autor nabyvateli*:

   ☒ v tištěné formě – počet exemplářů: 2

   ☒ v elektronické formě – počet exemplářů: 2

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.

3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.

4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

---

* hodící se zaškrtněte

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizovaní výpisů, opisů a rozmnoženin.

2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.

3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti

   - ☒ ihned po uzavření této smlouvy
   - ☐ 1 rok po uzavření této smlouvy
   - ☐ 3 roky po uzavření této smlouvy
   - ☐ 5 let po uzavření této smlouvy
   - ☐ 10 let po uzavření této smlouvy
     (z důvodu utajení v něm obsažených informací)

4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.

2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.

3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísni a za nápadně nevýhodných podmínek.

4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: 21. května 2010

…….. ……

Nabyvatel Autor

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá návrhem regulace a regulátoru pro oběhové čerpadlo v solárním systému ohřevu užitkové vody. Je zde popsán základní princip a rozvržení regulačního okruhu topného systému. V první části se práce věnuje popisu regulace, uvedení základních pojmů, vlastností a rozdílů mezi jednotlivými typy regulace. Popisuje se především regulace spojitá a diskrétní se zaměřením na regulátory typu PID a PSD. Další část práce se zaměřuje na koncepční řešení regulátoru oběhového čerpadla. Je zde popsán návrh jednotlivých částí zapojení, podmínky výběru součástek a schéma zapojení regulátoru. Třetí část práce se zabývá návrhem řídícího algoritmu regulátoru. V jednotlivých kapitolách jsou podrobně popsány použité knihovny a funkce, které byly při programování algoritmu PSD regulátoru použity. V závěru práce je popsána regulovaná soustava slunečních kolektorů, která je vyvíjena pro reálné odzkoušení a nastavení regulátoru.

KLÍČOVÁ SLOVA

Regulace, PID regulátor, solární systém, oběhové čerpadlo,ATmega16, WiFi, teplota

ABSTRACT

This master's thesis deals with the design of regulation of a circulating pump in a solar system for heating of supply water and the design of regulator for this system. It describes a fundamental principle and layout of a regulated circuit of a heating system. Description of regulation, basic terms, properties and differences between different types of regulation are described in first part of the master's project. Especially continuous (PID regulator) and discrete (PSD regulator) regulation are presented. Second part of the master's project is focused on a conceptual design of the circulating pump regulator. The connection system of each part, selection conditions of components and connection scheme of regulator are described. The third section deals with design of controlling algorithm of the regulator. There is a detailed description of libraries and functions in each chapter which were used in programming of PSD regulator algorithm. The regulated system of a solar collector is described at the end of the work. This system is being developed for real testing and setting of regulator.

KEYWORDS

regulator, PID loop control, solar system, circulating pump, ATmega16, temperature,WiFi

PAZOUR, Z. *Víceparametrový regulátor oběhového čerpadla.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 80 s., 7 příl., Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že diplomovou práci na téma Víceparametrový regulátor oběhového čerpadla jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne ....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Tomáši Kratochvílovi, Ph.D. za účinnou metodickou a pedagogickou pomoc a Ing. Bohdanu Růžičkovi, Ph.D. za odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne ....

(podpis autora)

OBSAH

Seznam obrázků xi

Seznam tabulek xiii

Úvod 1

1 Solární systém 2

1.1 Kolektory ... 3

1.2 Zásobník teplé vody ... 3

1.3 Oběhové čerpadlo ... 3

1.4 Regulátor ... 3

2 Regulace 4

2.1 Statické a dynamické vlastnosti regulačních členů ... 5

2.1.1 Vnější popis systému ... 5

2.1.2 Vnitřní popis systému ... 6

2.2 Přesnost regulace ... 6

2.3 Stabilita regulačního obvodu ... 6

3 Spojité Regulátory 7

3.1 Blokové schéma spojitého regulátoru ... 7

3.1.1 Měřicí člen ... 8

3.1.2 Ústřední člen ... 8

3.1.3 Akční člen ... 8

3.2 Základní typy spojitých regulátorů ... 8

3.2.1 Proporcionální regulátor (P) ... 9

3.2.2 Integrační regulátor (I) ... 9

3.2.3 Derivační regulátor (D) ... 10

3.3 Spojitý PID regulátor ... 11

4 Diskrétní regulace, regulátory 13

4.1 Regulační obvod ... 13

4.1.1 A-D převodník ... 14

4.1.2 D-A převodník ... 14

4.2 Číslicové regulátory ... 15

5 Nastavení regulátorů 17

6 Návrh regulátoru 18

7 Obvodové řešení regulátoru 19

7.1 Mikroprocesor 20

7.1.1 Základní vlastnosti mikrokontroléru ATmega16 20

7.1.2 Zapojení mikroprocesoru 21

7.1.3 Programování mikroprocesoru 23

7.2 Analogové vstupy 24

7.2.1 Teplotní senzory 24

7.2.2 Křemíkové teplotní senzory KTY81 /210 25

7.2.3 Odporové teplotní senzory PT100 26

7.2.4 Zapojení teplotních senzorů v obvodu regulátoru 26

7.3 Napájecí zdroj 30

7.4 Analogový výstup 31

7.5 Periférie 32

7.5.1 Tlačítka 32

7.5.2 LCD Displej 33

7.5.3 Obvod reálného času 35

7.5.4 Paměť EEPROM 38

7.5.5 Komunikační rozhraní 39

8 Konstrukce regulátoru 41

8.1 Deska zdroje 42

8.2 Deska mikroprocesoru a periferií 44

8.3 Deska tlačítek 47

8.4 Sestava regulátoru 48

9 Kalibrace teplotních čidel 51

9.1 Kalibrace PT100 51

9.2 Kalibrace KTY 81-210 52

10 Ovládací program regulátoru 53

10.1 Funkce knihovny psd.c 54

10.2 Funkce knihovny i2c.c 55

10.3 Funkce knihovny menu.c 55

10.4 Funkce knihovny lcd.c 56

10.5 Funkce knihovny uart.c 56

10.6 Vlastní algoritmus regulátoru 57

11 Komunikační WiFi modul **58**

11.1 Zapojení komunikačního modulu 59

11.2 Konstrukce modulu 61

12 Webový server **64**

13 Modelová soustava solárního systému **66**

13.1 Sluneční kolektor 66

13.2 Regulátor topného tělesa 67

13.3 Zásobník teplé vody 68

14 Nastavení regulátoru **69**

14.1 Přechodová charakteristika 69

14.2 Dynamické parametry regulované soustavy 72

14.3 Porovnání regulátorů 73

15 Závěr **76**

Literatura **77**

Seznam zkratek **79**

Seznam příloh **80**

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1.1 Zapojení solárního systému pro ohřev vody ... 2
Obrázek 1.2 Vakuový kolektor ... 3
Obrázek 2.1 Blokové schéma regulačního obvodu ... 4
Obrázek 2.2 Člen s jednou vstupní a jednou výstupní veličinou ... 5
Obrázek 3.1 Blokové schéma regulátoru ... 7
Obrázek 3.2 Základní zapojení a přechodová charakteristika ideálního regulátoru P ... 9
Obrázek 3.3 Základní zapojení a přechodová charakteristika ideálního regulátoru I ... 10
Obrázek 3.4 Základní zapojení a přechodová charakteristika ideálního regulátoru D ... 10
Obrázek 3.5 Základní zapojení (a) paralelního a (b) sériového regulátoru PID ... 12
Obrázek 3.6 Přechodová charakteristika ideálního regulátoru PID ... 12
Obrázek 4.1 Blokové schéma diskrétního regulačního obvodu ... 13
Obrázek 4.2 Princip vzorkování ... 14
Obrázek 4.3 Tvarování signálu ... 14
Obrázek 7.1 Blokové schéma regulátoru ... 19
Obrázek 7.2 Rozložení vývodů mikroprocesoru ATmega16 v pouzdře TQFP 44 ... 21
Obrázek 7.3 Zapojení mikroprocesoru ATmega16 ... 22
Obrázek 7.4 Zapojení konektoru SPI ... 23
Obrázek 7.5 Nastavení programovatelných pojistek mikroprocesoru ... 24
Obrázek 7.6 Závislost odporu čidla KTY 81/210 na teplotě ... 25
Obrázek 7.7 Závislost odporu čidla PT100 na teplotě ... 26
Obrázek 7.8 Zapojení vstupního obvodu teplotních čidel PT100 ... 27
Obrázek 7.9 Zapojení napájecího zdroje ... 30
Obrázek 7.10 Průběh výstupního napětí regulátoru ... 31
Obrázek 7.11 Zapojení výstupu regulátoru ... 32
Obrázek 7.12 Zapojení tlačítek ... 33
Obrázek 7.13 Zapojení LCD displeje ... 34
Obrázek 7.14 Popis jednotlivých pinů LCD displeje ... 34
Obrázek 7.15 Zapojení obvodu RTC ... 35
Obrázek 7.16 Princip komunikace – mikroprocesor vysílá data a obvod RTC je přijímá ... 36
Obrázek 7.17 Adresa obvodu RTC pro identifikaci na sběrnici I2C ... 36
Obrázek 7.18 Funkce jednotlivých registrů ... 37
Obrázek 7.19 Rozsah jednotlivých registrů ... 37

Obrázek 7.20 Zapojení paměti EEPROM 38
Obrázek 7.21 Posloupnost ukládání dat na externí EEPROM 38
Obrázek 7.22 Zapojení obvodu RS-232 40
Obrázek 8.1 Vyplněný specifikační list 41
Obrázek 8.2 Klišé plošných spojů, strana TOP 42
Obrázek 8.3 Klišé plošných spojů, strana BOTTOM 42
Obrázek 8.4 Osazovací výkres, strana TOP 43
Obrázek 8.5 Osazovací výkres, strana BOTTOM 43
Obrázek 8.6 Klišé plošných spojů strana TOP 45
Obrázek 8.7 Klišé plošných spojů strana BOTTOM 45
Obrázek 8.8 Osazovací výkres, strana TOP 45
Obrázek 8.9 Osazovací výkres, strana BOTTOM 46
Obrázek 8.10 Klišé plošných spojů strana TOP 47
Obrázek 8.11 Klišé plošných spojů strana BOTTOM 47
Obrázek 8.12 Osazovací výkres, strana TOP 47
Obrázek 8.13 Osazovací výkres, strana BOTTOM 47
Obrázek 8.14 Uspořádání jednotlivých DPS regulátoru 48
Obrázek 8.15 Popis propojovacích konektorů (plošek) 49
Obrázek 8.16 Výsledný regulátor 49
Obrázek 9.1 Závislost čísla A/D převodu na teplotě pro PT100 51
Obrázek 9.2 Závislost čísla A/D převodu na teplotě pro KTY81-210 52
Obrázek 10.1 Vývojový diagram programu mikroprocesoru 53
Obrázek 11.1 WiFi modul firmy Connect One 58
Obrázek 11.2 Blokové schéma obvodu CO2144 58
Obrázek 11.3 Schéma zapojení modulu WiFi 60
Obrázek 11.4 Klišé plošných spojů strana BOTTOM 61
Obrázek 11.5 Osazovací výkres, strana TOP 62
Obrázek 11.6 Osazovací výkres, strana BOTTOM 62
Obrázek 11.7 Hotový komunikační modul 63
Obrázek 12.1 První stránka webserveru 64
Obrázek 12.2 Druhá stránka webserveru 65
Obrázek 13.1 Blokové schéma modelu soustavy solárního systému 66
Obrázek 13.2 Rám solárního panelu se zabudovaným topným tělesem 67
Obrázek 13.3 Závislost denních teplot a teplot solárního panelu dne 3.7.2009 68
Obrázek 13.4 Topná spirála 68

Obrázek 14.1 Přechodová charakteristika soustavy 70
Obrázek 14.2 Odezva soustavy na jednotkový skok 72
Obrázek 14.3 Závislost regulační odchylky na čase 73
Obrázek 14.4 Závislost teploty na použitém typu regulátoru 74
Obrázek 14.5 Závislost spotřeby elektrické energie na použitém regulátoru 75

SEZNAM TABULEK

Tabulka 7.1 Srovnání výpočtů teplotních čidel PT100 a KTY 81/210 29
Tabulka 8.1 Seznam součástek desky zdroje 44
Tabulka 8.2 Seznam součástek desky mikroprocesoru 46
Tabulka 8.3 Seznam součástek desky tlačítek 48
Tabulka 8.4 Seznam spojovacích a montážních součástek 50
Tabulka 11.1 Seznam použitých součástek 63
Tabulka 14.1 Vzorce pro návrh parametrů metodou Ziegler-Nicholse 70

ÚVOD

V dnešní době dochází stále častěji k využívání alternativních zdrojů energie. Hlavním ze zdrojů energie je nepochybně Slunce, které dodává na zemi minimální část své energie. Přesto energie záření dopadající na zemský povrch činí 200 násobek současných světových energetických potřeb. Světelné sluneční záření měníme na elektrickou energii (fotovoltaické články) a tepelnou energii (solární kolektory).

Pro maximální účinnost přeměny slunečního záření na teplo a jeho uchování patří také správná regulace oběhového čerpadla v použitém solárním systému pro ohřev teplé užitkové vody. Pro řízení oběhového čerpadla se používají různé řídící jednotky, které se nazývají regulátory. Regulátory pracují podle různých způsobů a implementovaných algoritmů. Jednoduché (např. dvoupolohové) pouze zapínají a vypínají přívod napětí k čerpadlu v závislosti na teplotě. Složitější regulátory používají implementované algoritmy a podle nich řídí oběhové čerpadlo.

Práce se zabývá systémy se solárními kolektory, především regulací a regulátory oběhového čerpadla. První část práce je věnována popisu regulace, uvedení základních pojmů, vlastností a rozdílů mezi jednotlivými typy regulace. Je zde popsána regulace spojitá a diskrétní se zaměřením především na regulátory typu PID a PSD.

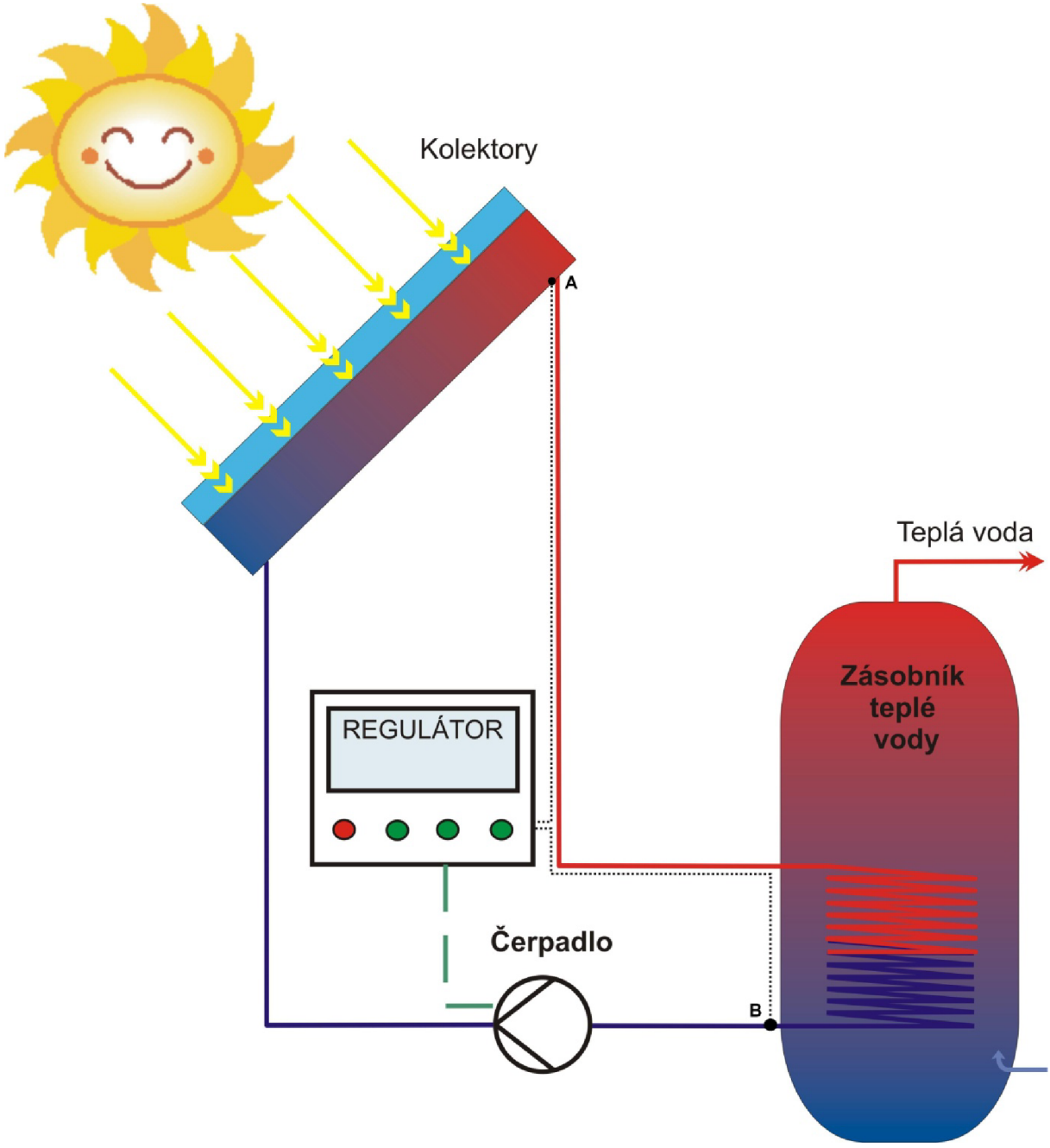
V druhé části práce je podrobně rozebrán návrh regulátoru. Hlavním cílem návrhu bylo vyrobit inteligentní PSD regulátor, který obsahuje snadno dostupné součástky a jehož cena se v základní verzi pohybuje v řádu stovek korun. Jsou zde popsány použité části, důvod jejich použití a schematické zapojení. Navrhovaný regulátor je diskrétního typu a využívá jako své jádro 8bitový mikroprocesor firmy Atmel. Ten obsahuje řídící algoritmus PSD regulátoru a obsluhuje externí obvody (LCD, RTC a WiFi).

Závěr práce je věnovaný implementovanému algoritmu mikroprocesoru a návrhu regulované soustavy.

1 SOLÁRNÍ SYSTÉM

Solární systémy jsou složeny z technických zařízení, které sluneční záření převádí na teplo pomocí ohřevu kapaliny. Ohřátá kapalina je poté rozvody přivedena ke spotřebiči (zásobník teplé vody, plavecký bazén, topná soustava budov…).

Základní zapojení topného okruhu solárního systému je ukázáno na obrázku 1.1. Okruh obsahuje všechny důležité zařízení potřebné pro správnou funkci.



Obrázek 1.1 Zapojení solárního systému pro ohřev vody

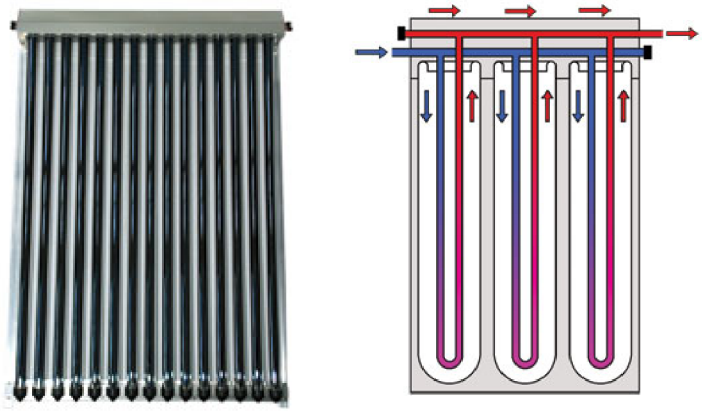
1.1 Kolektory

Kolektor (sběrač) je hlavní stavební díl celé soustavy. Je to zařízení, které slouží k přeměně slunečního záření na teplo. Kolektorů je vyráběno mnoho druhů pomocí různých technologií. Každý typ má své specifické použití vlastnosti a ztráty.

Nejznámější z nich jsou:

- Absorbéry z umělých hmot (ohřev vody v bazénech)
- Koncentrující kolektory (použití v solárních elektrárnách)
- Vakuové kolektory (menší výnos tepla než ploché)
- Ploché kolektory (nejčastěji používané)

Bližší popis, parametry a použití viz [1].



Obrázek 1.2 Vakuový kolektor (převzato z [15])

1.2 Zásobník teplé vody

Solární systémy jsou zapojeny většinou dvouokruhově. V primárním okruhu je jako absorbující kapalina používána nemrznoucí směs (použití systému i v zimě). Sekundární okruh je tvořen užitkovou (pitnou) vodou. Pro výměnu tepelné energie z primárního systému do sekundárního a k uchování teplé vody slouží zásobníky teplé vody. Jedná se většinou o tlakovou nádrž dimenzovanou na určitý objem podle způsobu použití. Velmi často bývají doplněny o tepelnou izolaci.

1.3 Oběhové čerpadlo

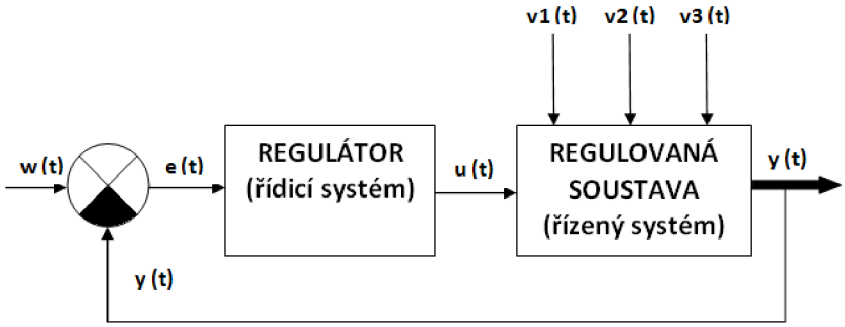
Cirkulaci kapaliny v primárním okruhu solárního systému zajišťuje čerpadlo. Rychlost cirkulace kapaliny je regulovaná veličina, jejíž úroveň má vliv na optimální využití systému.

1.4 Regulátor

Pro řízení rychlosti oběhového čerpadla je použit regulátor. Ten na základě různých parametrů, které snímá (např. teplota), nastaví podle implementovaného algoritmu (PI, PID…) rychlost cirkulace kapaliny v systému pomocí výkonového výstupu připojeného k oběhovému čerpadlu.

2 REGULACE

Regulace je řízení se zpětnou vazbou. Úkolem regulace je nastavení technických veličin (teplota, tlak, otáčky, …) na požadovanou hodnotu a udržovat je na této konstantní hodnotě i při působení poruch a vnějších vlivů. Regulace se uskutečňuje v regulačním systému nazývaném regulační obvod (viz obrázek 2.1). V regulačním obvodu se vyskytují především dvě části. První část se nazývá **regulátor** (řídicí systém). Druhá část je **regulovaná soustava** (řízený systém), která je objektem regulace (je regulována regulátorem).



Obrázek 2.1 Blokové schéma regulačního obvodu

Veličina, jejíž hodnota je výstupem z regulované soustavy a která se regulací udržuje na požadované hodnotě, se nazývá **regulovaná veličina** a označuje se symbolem *y*. **Žádaná hodnota** (tzv. řídící veličina) *w* je veličina, pomocí níž se nastavuje hodnota, kterou má dosahovat regulovaná veličina. Určuje tedy vždy žádanou hodnotu regulované veličiny.

V regulačním obvodu se hodnota regulované veličiny trvale měří a porovnává se žádanou hodnotou a vytváří se rozdíl, který se nazývá **regulační odchylka** *e:*

$$e = w - y \quad . \tag{2.1}$$

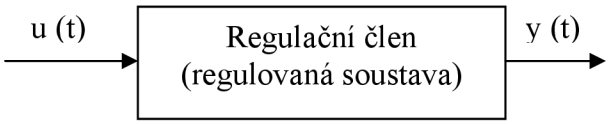
Jakmile je rozdíl mezi regulovanou hodnotou a její požadovanou hodnotou nenulový, tak regulátor provádí akční zásah. Míra zásahu je obvykle závislá na velikosti odchylky *e* a uskutečňuje se pomocí výstupní veličiny regulátoru nazývanou **akční veličina** *u*. Regulátor musí být zapojen tak, aby akční veličina zmenšovala regulační odchylku.

Příčinou, proč musíme regulovat, jsou poruchy – poruchové veličiny *v1, v2, v3* atd. Poruchové veličiny působí nežádoucím a nepředvídaným způsobem na regulovanou soustavu a ovlivňují regulovanou veličinu.

Průběhy všech veličin svázané s regulací se odehrávají v čase. Tyto časové průběhy (*y(t), w(t), u(t), v1-v3(t), e(t)*) charakterizují regulační proces.

2.1 Statické a dynamické vlastnosti regulačních členů

Pod pojmem regulační člen budeme uvažovat základní člen regulačního obvodu. Může to být např.: regulovaná soustava, regulátor, snímač, servomotor atd. Jsou to členy, které většinou mají jednu vstupní a jednu výstupní veličinu (viz obrázek 2.2)



Obrázek 2.2 Člen s jednou vstupní a jednou výstupní veličinou

Statické vlastnosti posuzují vlastnosti regulačních členů v ustáleném stavu. Dynamické vlastnosti popisují změny vstupních a výstupních veličin.

Statické vlastnosti regulačních členů se nejčastěji vyjadřují statickou charakteristikou, což je závislost mezi vstupní a výstupní veličinou v ustáleném stavu. Znamená to, že při snímání statické charakteristiky musíme vždy počkat na ustálení vstupní i výstupní veličiny (musí proběhnout přechodový děj). Ustálené veličiny poté vynášíme do grafu, kde na vodorovnou osu dosadím vstupní veličinu a na svislou výstupní veličinu.

V regulaci nás více zajímá průběh přechodového děje, který je vyjádřen dynamickými vlastnostmi. Dynamické vlastnosti lze popsat dvěma zcela odlišnými způsoby:

- vnější popis systému
- vnitřní popis systému

2.1.1 Vnější popis systému

Při vnějším popisu vyjadřujeme dynamické vlastnosti systému pomocí vztahu mezi vstupní a výstupní veličinou. Nezajímá nás obsah, fyzikální a konstrukční realizace systému. Systém zkoumáme pomocí reakce výstupu na vstupní podměty. Vnější popis systému je používán jako klasická metoda regulační techniky, protože je jednodušší a pro většinu systémů plně dostačuje. Způsoby vnějšího popisu jsou:

- diferenciální rovnice systému
- přenos
- impulsní charakteristika a funkce
- přechodová funkce a charakteristika
- frekvenční přenos
- frekvenční charakteristiky
- poloha pólů a nul

Základní vlastnosti a způsob jednotlivých popisů je podrobně obsažen v literatuře [2], [3], [4].

2.1.2 Vnitřní popis systému

Vnitřní popis systému vyjadřuje dynamické vlastnosti pomocí vztahů mezi vstupními, výstupními veličinami a stavem systému. Pro zavedení vnitřního popisu systému musíme znát jeho strukturu a veškeré fyzikální nebo chemické pochody, které v něm probíhají. Z toho je zřejmé, že je dokonalejší než vnější popis. Popis systému zahrnující i vnitřní strukturu je komplexnější, ale také složitější.

2.2 Přesnost regulace

V této kapitole je uvažována přesnost regulace v ustáleném režimu regulačního obvodu, která se často označuje jako statická přesnost regulace. Jedná se o stavy regulačních obvodů po odeznění přechodových dějů. Jak již vyplynulo z dřívějšího popisu, má jednoduchý regulační obvod splňovat dva základní úkoly.

1. Eliminovat vliv poruchových veličin

Při změně poruchové veličiny *v* se tato porucha odstraní, regulovaná veličina se opět ustálí na původní hodnotě a regulační odchylka by měla být

$$e_v(\infty) = 0. \tag{2.2}$$

2. Změnou řídicí veličiny umožnit změnu požadované hodnoty regulované soustavy

Při změně žádané hodnoty *w* se regulovaná veličina y po odeznění přechodového děje změní na stejnou hodnotu, jako se změnila *w* a regulační odchylka by měla být

$$e_w(\infty) = 0. \tag{2.3}$$

Mohou ale nastat případy, že při působení poruchové veličiny *v* tato není zcela vyeliminována ani v čase $t \to \infty$ a regulovaná veličina *y* nebude mít původní hodnotu. Vznikne trvalá regulační odchylka. Tento případ může nastat i při změně žádané hodnoty *w*.

2.3 Stabilita regulačního obvodu

Stabilita je základní a nevyhnutelná podmínka správné funkce regulačního obvodu. Regulační obvod je stabilní, jestliže se po vychýlení z rovnovážného stavu způsobeného poruchami, vrátí zpět do rovnovážného stavu po jejich odstranění. Matematicky vyjádřená definice stability je

$$\lim_{t\to\infty} y\,(t) = 0. \tag{2.4}$$

Je třeba zajistit, aby regulační obvod byl stabilní. Zatímco parametry regulované soustavy jsou dány její konstrukcí a nelze je měnit, můžeme měnit parametry regulátorů tak, aby se dosáhlo stabilního obvodu. Více v literatuře [2], [3], [4].

3 SPOJITÉ REGULÁTORY

Regulátor je zařízení, které provádí regulaci tak, aby se regulovaná veličina udržovala na stanovené hodnotě. Regulátory dělíme podle průběhu výstupního systému na:

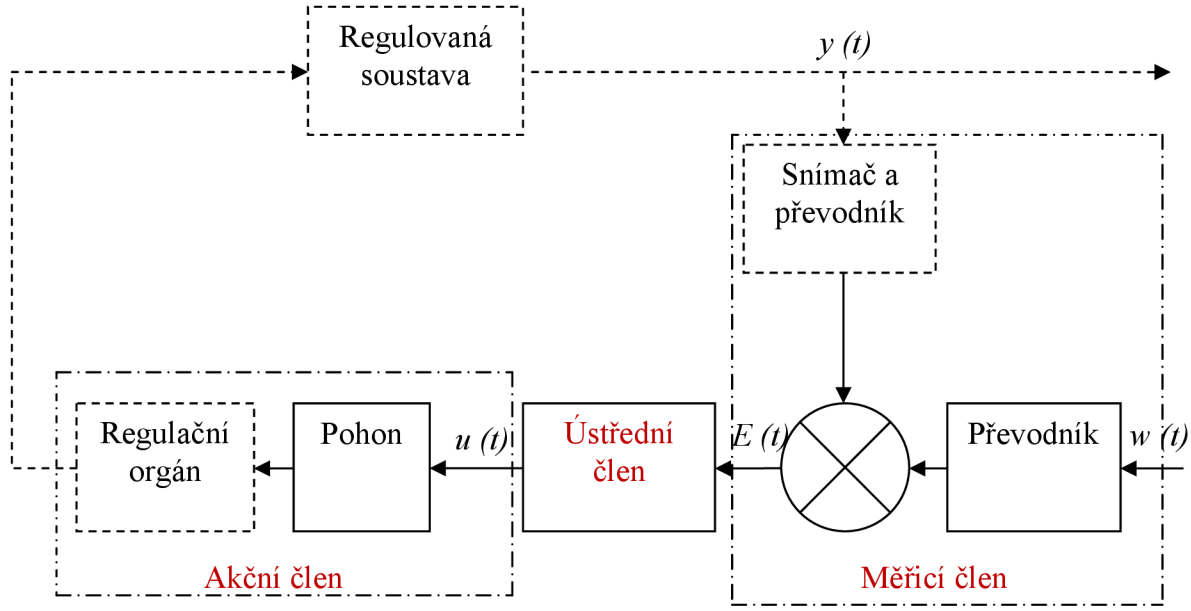
- spojité
- nespojité

Spojité regulátory pracují se spojitými signály. Hlavní stavební prvky jsou operační zesilovače a pasivní součástky. V případě spojitých regulátorů je kvalita regulace dobrá a návrh regulace poměrně snadný. Jsou základem regulační techniky.

Stále častěji se do popředí dostávají regulátory nespojité. Pracují s nespojitými signály a jejich výstupem je posloupnost numerických hodnot. Základem těchto regulátorů je číslicový počítač, který pomocí daného algoritmu plní funkci regulátoru.

3.1 Blokové schéma spojitého regulátoru

Každý regulátor se skládá z několika prvků (obrázek 3.1). Základem jsou tři prvky zapojené v sérii. Jsou to měřicí člen (čidlo), ústřední člen a akční člen.



Obrázek 3.1 Blokové schéma regulátoru

3.1.1 Měřicí člen

Měřicí člen zajišťuje skutečnou hodnotu regulované veličiny, převádí ji na elektrické napětí a vytváří regulační odchylku. Měřicí člen se skládá ze snímače s převodníkem, z převodníku řídící veličiny a z porovnávacího členu. Jako snímač s převodníkem si můžeme představit čidlo, které zajišťuje časový průběh regulované veličiny (teplota, tlak, …). Pro docílení dobré regulace je třeba zvolit vhodné čidlo a jeho umístění v regulované soustavě. Přesnost regulované soustavy nemůže být větší než přesnost použitého čidla. Výstupem čidla je signál úměrný regulované veličině.

3.1.2 Ústřední člen

Ústřední člen regulátoru zpracovává regulační odchylku. Regulační odchylku může zesilovat, integrovat, nebo derivovat. Označuje se často jako regulátor v užším slova smyslu a často si pod pojmem regulátor představujeme pouze ústřední člen. Ústřední člen má rozhodující vliv na regulační pochod. Jeho vlastnosti je možné volit a právě při návrhu regulátoru se hledá takový ústřední člen s parametry, které nám zajistí vyhovující vlastnosti celého obvodu. Ústřední člen také určuje dynamické vlastnosti celého regulátoru.

3.1.3 Akční člen

Tento člen se skládá z pohonu a regulačního orgánu. Regulační orgán je však často považován za součást regulované soustavy. Pohon dodává regulačnímu orgánu energii (mění jeho polohu, natočení, otáčky, …). U regulačního orgánu je většinou požadována jeho lineární závislost změny parametru v závislosti na velikosti akční veličiny. Jako regulační orgán si můžeme v našem případě představit čerpadlo a akční veličina regulátoru (např.: PWM) bude měnit jeho otáčky.

3.2 Základní typy spojitých regulátorů

Regulátor může regulační odchylku zesilovat, integrovat a derivovat. Nejjednodušší případ je pouhé zesilování (regulátor je prostý zesilovač). Regulátor nazýváme proporcionální neboli P regulátor a jeho akční veličina je úměrná regulační odchylce

$$u(t) = r_0 e(t), \tag{3.1}$$

kde *u(t)* je akční veličina, r_0 je proporcionální konstanta a *e(t)* je regulační odchylka.

Častým případem regulátoru je integrační, neboli I regulátor. Jeho akční veličina je úměrná integrálu regulační odchylky

$$u(t) = r_{-1} \int e\,(t)dt, \tag{3.2}$$

kde r_{-1} je integrační konstanta.

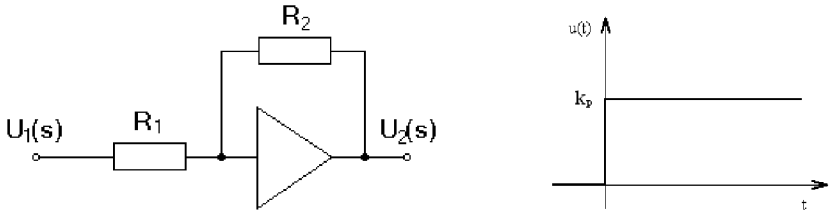
Poslední ze základních typů regulátoru regulační odchylku derivuje, proto není jeho realizace jako samostatného regulátoru možná. Používá se v kombinaci s předchozími typy regulátorů. Regulátor nazýváme derivační, neboli regulátor typu D. Akční veličina je úměrná regulační odchylce

$$u(t) = r_1 e'\,(t), \tag{3.3}$$

kde r_1 je derivační konstanta.

3.2.1 Proporcionální regulátor (P)

Nejméně komplikovaný regulátorem je proporcionální regulátor, tzv. regulátor typu P. Čím větší detekuje momentální regulační odchylku, tím větší je i jeho akční zásah. Jako jediný stavitelný parametr P regulátoru je jeho zesílení r_0 . Je to konstanta úměrnosti, neboli převodní konstanta mezi velikostí regulační odchylky e a generovanou hodnotou akční veličiny u. Tato konstanta určuje i dobu trvání regulačního pochodu (čím je větší r_0 , tím důraznější je regulační zásah a kratší doba regulace). Zesílení regulátoru může být hodně vysoké, aniž by hrozila nestabilita, nebo překmity regulované veličiny. Používá se velmi často např. na stabilizaci pevných bodů, stabilizaci napětí, proudu, teploty (např. regulace teploty žehličky. Nevýhodou regulátorů P je ovšem trvalá **regulační odchylka**, kterou lze snížit zvětšením zesílení, ale nikdy se nám nepodaří ji odstranit.



Obrázek 3.2 Základní zapojení a přechodová charakteristika ideálního regulátoru P

3.2.2 Integrační regulátor (I)

Poněkud komplikovanější, a to nejen z matematického hlediska, je zpracování regulační odchylky integračním regulátorem. Změna akční veličiny je v tomto případě úměrná časové hodnotě integrálu z regulační odchylky.

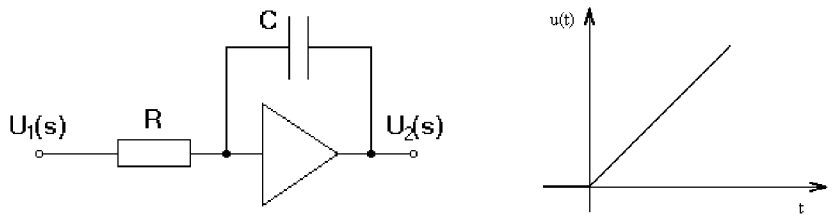
Například máme regulovanou soustavu, kde plynový hořák udržuje teplotu vody. Zde bude po určitý interval, např. $\Delta t = 10$ s, rozdíl mezi žádanou a skutečnou teplotou konstantní a roven 2°C. Za uvedenou dobu se v paměti I regulátoru „naintegruje“ hodnota 20. Jestliže přitom počátek sledovaného intervalu leží zároveň na počátku časové osy a konstanta úměrnosti je např. $r_{-1} = 0{,}1$, otevře během sledovaného intervalu regulátor I ventil přívodu hořáku lineárně s rychlostí 0,2 dílku/s.

Zde jsme uvažovali konstantu úměrnosti r_{-1} . Podle přenosu daného rovnicí (3.6) se častěji vyskytuje ve své převrácené podobě

$$T_i = \frac{r_0}{r_{-1}}. \tag{3.3}$$

Platí, že čím je větší hodnota T_i , tím menší je vliv regulátoru I na hodnotu akční veličiny.

Pokud budeme regulovat proporcionální soustavy regulátorem I, je tento regulátor schopen zcela eliminovat regulační odchylku. Regulátory I jsou náchylnější na kmitání regulačního pochodu a tím zhoršují stabilitu celého obvodu. Tyto nevýhody omezují samostatné působení regulátoru na poměrně úzký okruh zařízení a v praxi se zásadně používají v kombinaci s proporcionálním regulátorem.



Obrázek 3.3 Základní zapojení a přechodová charakteristika ideálního regulátoru I

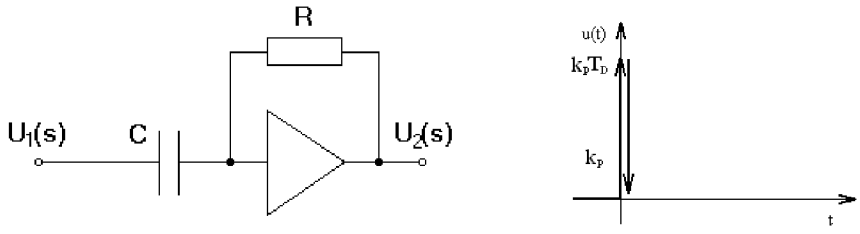
3.2.3 Derivační regulátor (D)

Přibližně na stejné úrovni jako integrační regulátor je z pohledu matematické složitosti zpracování regulační odchylky derivačním regulátorem typu D. Jak napovídá název, je změna akční veličiny úměrná hodnotě derivace regulační odchylky. To znamená, že hodnota akční veličiny regulátoru D odpovídá okamžité hodnotě rychlosti změny rozdílu mezi žádanou a skutečnou hodnotou regulované veličiny.

Pokud např. odchylka teplot vzroste v časovém intervalu Δt=10s lineárně z 2°C na 3°C, bude na výstupu regulátoru hodnota úměrná průměrné změně rychlosti regulační odchylky, tj. 0,1°C a ventil přívodu plynu k hořáku tak bude, při konstantě úměrnosti r_1 = 10, po celý sledovaný interval otevřen na jeden dílek.

Konstanta úměrnosti je v tomto případě označována jako r_1, popřípadě podle (3.6) jako časová konstanta T_d.

V praxi však není možné samostatné použití tohoto typu regulátoru. Je to pro jeho vlastnost zesilovat derivací šumové napětí, pro jeho neschopnost reagovat na ustálenou hodnotu regulační odchylky a pro nestabilitu celého regulačního obvodu způsobenou velkými odezvami na prudké změny regulační odchylky, které mohou vést až k nekontrolovatelnému rozkmitání regulačních orgánů.



Obrázek 3.4 Základní zapojení a přechodová charakteristika ideálního regulátoru D

3.3 Spojitý PID regulátor

Paralelním zapojením všech tří základních typů regulátorů dostáváme regulátor proporcionálně integračně derivační (dále jen PID). Tento regulátor má akční veličinu úměrnou regulační odchylce, jejímu integrálu a její derivaci.

Proporcionální složka zabezpečuje základní chování zpětnovazebního regulačního členu. Čím více se liší výstup soustavy od požadované hodnoty, tím je větší zásah, který má tuto chybu napravit. Pro odstranění trvalé regulační odchylky slouží integrační složka. Existuje-li nenulová regulační odchylka, přičítá integrační složka trvale k akčnímu zásahu jí úměrnou hodnotu, dokud odchylka nezmizí. Integrační složka ale také snižuje stabilitu obvodu. Ke zvýšení stability a zrychlení regulačního děje slouží derivační složka. Ta funguje jako „brzda“ – čím rychleji se regulační odchylka mění, tím více působí derivační složka proti směru změny.

Matematický popis ideálního regulátoru znázorňuje rovnice (3.4).

$$u\,(t) = r_0 e(t) + r_{-1} \int e(t)dt + \; r_1 e'(t) \tag{3.4}$$

Přenos PID regulátoru je pak

$$G_R(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = r_0 + \frac{r_{-1}}{s} + r_1 s, \tag{3.5}$$

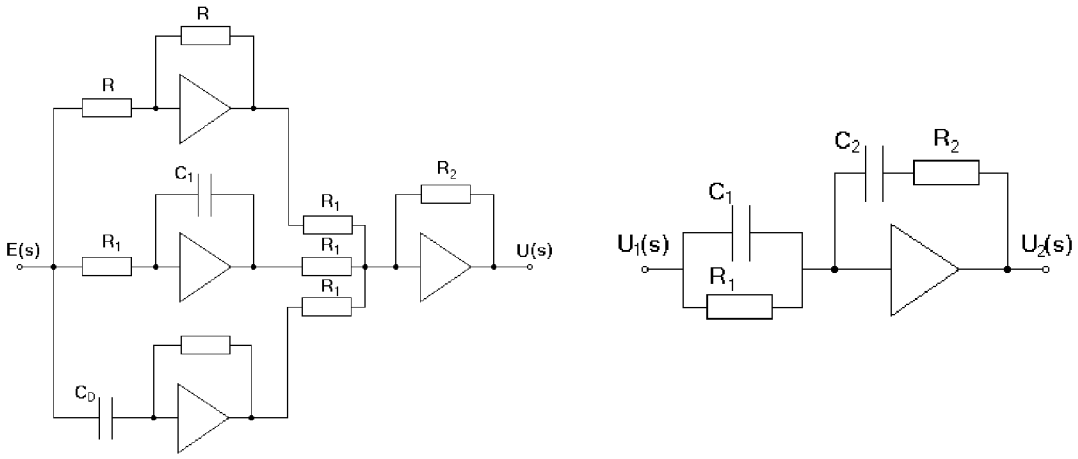
kde *E(s)* a *U(s)* jsou vstup a výstup regulátoru v Laplaceových obrazech. Konstanty r_0, r_{-1} a r_1 v rovnicích regulátorů určují vliv jednotlivé složky (proporcionální, integrační a derivační) na tvorbu výsledné akční veličiny. V regulátorech jsou stavitelné a dají se nastavit tak, aby výsledná regulace splňovala to, co od ní očekáváme. Častěji se však udávají v jiném tvaru uvedeném v rovnici (3.6).

$$G_R(s) = r_0 + \frac{r_{-1}}{s} + r_1 s = \left(1 + \frac{1}{\frac{r_0}{r_{-1}}} + \frac{r_1}{r_0} s\right) = r_0 \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s\right) \tag{3.6}$$

Zde r_0 je nejčastěji bezrozměrná proporcionální konstanta, která bývá nazývána zesílení regulátoru. U běžných regulátorů je nastavitelná v rozmezí od 0,1 do 50. Integrační konstanta regulátoru T_i je udávaná v sekundách. Derivační časová konstanta regulátoru se označuje T_d .

Místo zesílení r_0 se často používá termín **pásmo proporcionality (PP),** které je udáváno v procentech. Pásmo proporcionality udává, o kolik procent z celého rozsahu se musí změnit vstupní signál regulátoru, aby se výstup změnil v celém rozsahu. Vztah mezi pásmem proporcionality a zesílením r_0 je

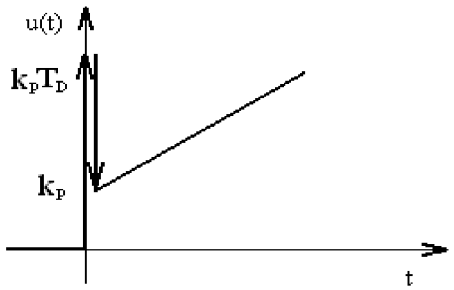
$$pp = \frac{1}{r_0} \times 100 \quad [\%] \tag{3.7}$$



a) b)

Obrázek 3.5 Základní zapojení (a) paralelního a (b) sériového regulátoru PID

Regulátor na obrázku 3.5a je nazýván standardní, paralelní nebo též neinteraktivní, poněvadž všechny tři složky (P, I, D) mohou být seřizovány nezávisle. Naproti tomu u regulátoru na obrázku 3.5b jsou všechny tři složky závislé. Změníme-li například parametr T_d derivační složky, změní se i integrační složka. Z tohoto důvodu by se dalo čekat, že většina vyráběných regulátorů bude neinteraktivního typu. Bohužel výrobci volí dost často právě interaktivní typ z důvodu snadnější analogové realizace regulátoru.

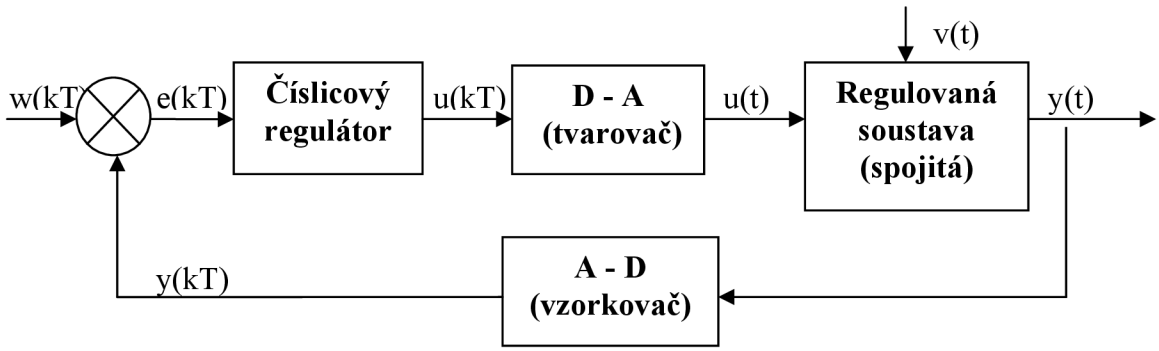


Obrázek 3.6 Přechodová charakteristika ideálního regulátoru PID

4 DISKRÉTNÍ REGULACE, REGULÁTORY

4.1 Regulační obvod

Diskrétní regulační obvod (obrázek 4.1) je takový obvod, ve kterém má alespoň jedna veličina tvar posloupnosti diskrétních hodnot vytvářených např. v pravidelných (ekvidistantních) časových okamžicích, které bývají vyjádřeny diskrétní funkcí *f(kT)*.



Obrázek 4.1 Blokové schéma diskrétního regulačního obvodu

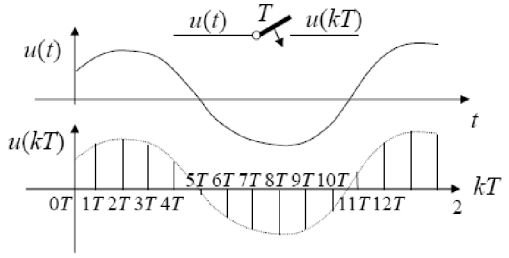
Diskrétní funkce vyjadřuje posloupnost hodnot v tzv. vzorkovacích okamžicích (t = T, 2T, 3T, …). Hodnota *T* se nazývá vzorkovací perioda a je vázána vztahem (4.1) se vzorkovací frekvencí ω_v, kde

$$\omega_v = \frac{2\pi}{T}. \tag{4.1}$$

Jak je patrné z blokového schéma diskrétního regulačního obvodu, jedná se o běžný typ regulačního obvodu. Regulovaná je zde spojitá soustava, proto máme spojitou také regulovanou veličinu *y (t). Ta* je prostřednictvím analogově-digitálního převodníku vzorkována s periodou *T* a převedena do číslicového tvaru, tj. na diskrétní funkci *y(kT)*. Číslicový regulátor poté vypočítá regulační odchylku *e(kT)* a vlastní řídicí algoritmus počítače určí hodnotu zásahu *u(kT)*. Tato hodnota je poté digitálně-analogovým převodníkem převedena na spojitý signál *u(t)*, který prostřednictvím regulačního orgánu působí na regulovanou soustavu. Některé diskrétní regulátory nepřevádí signál *u(kT)* na spojitý signál, ale spojitou soustavu řídí nespojitě (diskrétně) pomocí pulsně šířkové modulace (PWM).

4.1.1 A-D převodník

A-D převodník bývá velmi často nazývaný jako vzorkovač. Provádí periodické snímání hodnoty vstupní veličiny (např. *y(t)*). Její hodnotu měří v pravidelných intervalech ve formě vzorků. Na obrázku 4.2 je naznačen princip vzorkování.



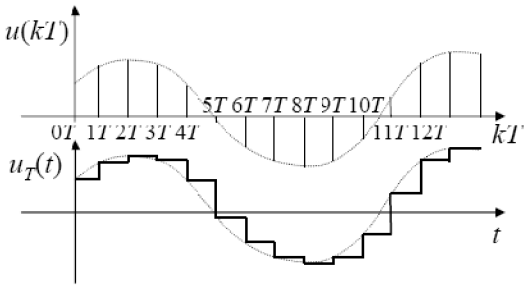
Obrázek 4.2 Princip vzorkování (převzato z [2])

Základní otázkou při vzorkování je délka periody *T*, tedy po jakou dobu může být regulovaná veličina bez sledování a regulovaná soustava bez akčního zásahu. Délka vzorkovací periody se proto odvíjí od druhu regulované soustavy a na její zjištění existují různé empirické vzorce. Další možností je nastavení vzorkovací frekvence pomocí mezní úhlové frekvence ω_m a Shannonovy podmínky vzorkování (4.2).

$$T \leq \frac{\pi}{\omega_m} \tag{4.2}$$

4.1.2 D-A převodník

D-A převodník bývá velmi často nazývaný jako tvarovač. Působí-li diskrétní signál jako vstupní veličina do spojité regulované soustavy, je zapotřebí ho upravit – tvarovat. Diskrétní signál totiž obsahuje řadu nekonečně krátkých impulsů, jejichž amplituda je nositelem informace, ne však energie, kterou by mohl předávat následujícímu členu obvodu. Tvarování diskrétního signálu je v podstatě jeho přeměna na spojitý signál. Výstupní veličina tvarovače je po celou délku periody *T* konstantní a je rovna amplitudě vstupního impulsu přivedeného na počátku této periody viz obrázek 4.3.



Obrázek 4.3 Tvarování signálu (převzato z [2])

4.2 Číslicové regulátory

Každý spojitý regulátor má i svou číslicovou verzi. Pro spojité regulátory P, I, PD, PID se jejich číslicové verze označují P (proporcionální), S (sumační), PD (proporcionálně diferenční), PSD (proporcionálně sumačně diferenční).

Od číslicového regulátoru požadujeme stejnou funkci jako od regulátoru spojitého a proto vycházíme z rovnice spojitého PID regulátoru (3.4), kde si vytkneme r_0, abychom získali tvar s časovými konstantami. Výchozí rovnice regulátoru potom je

$$u(t) = r_0 \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t)dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \tag{4.3}$$

s přenosem

$$G_R(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = r_0 \left[1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right] . \tag{4.4}$$

Číslicovou verzi PID regulátoru získáme, když integrál nahradíme sumací (4.5) a derivaci zpětnou diferencí (4.6).

$$\int_0^t e(t)dt \rightarrow T \sum_{i=0}^{k} e(iT) \tag{4.5}$$

$$\frac{de(t)}{dt} \rightarrow \frac{\nabla \mathrm{e(kT)}}{\mathrm{T}} , \tag{4.6}$$

kde $\nabla \mathrm{e(kT)}$ je zpětná diference definovaná vztahem (4.7).

$$\nabla \mathrm{e(kT)} = e(kT) - e[(k-1]T . \tag{4.7}$$

Tomuto algoritmu číslicového regulátoru se říká polohový algoritmus. Hodnota integrálu se získává sumací a hodnota derivace pomocí diference. Proto se tyto regulátory nazývají proporcionálně-sumačně-diferenční, a označují se zkratkou PSD. Polohový algoritmus se kvůli sumaci příliš často nepoužívá. Častěji proto používáme **přírůstkový tvar algoritmu** PSD regulátoru. Zde se neurčuje hodnota akční veličiny *u(kT)* v daném okamžiku, ale pouze její změna, čili přírůstek oproti hodnotě *u[(k-1)T]* akční veličiny v předcházejícím kroku.

Diferenční rovnice PSD pro diskrétní čas $[(k-1)T]$ je vyjádřena vztahem

$$u[(k-1)T] = r_0 \left[e[(k-1)T] + \frac{T}{T_i} \sum_{i=1}^{k-1} e(iT) + \frac{T_D}{T} \nabla e[(k-1)T] \right]. \tag{4.8}$$

Diferenční rovnice PSD pro diskrétní čas (kT) je vyjádřena vztahem

$$u(kT) = r_0 \left[e(kT) \; + \frac{T}{T_i} \sum_{i=0}^{k} e(iT) + \frac{T_D}{T} \nabla e(kT) \right]. \tag{4.9}$$

Po odečtení těchto dvou vztahů získáme přírůstkový tvar algoritmu PSD regulátoru

$$\nabla u(kT) = r_0 \left[\nabla e(kT) \; + \frac{T}{T_i} \nabla e(kT) + \frac{T_D}{T} \nabla^2 e(kT) \; \right], \tag{4.10}$$

kde

$$\nabla^2 e(kT) = \nabla \mathrm{e(kT)} - \nabla \mathrm{e}[(k-1)T] = e(kT) - 2e[(k-1)T] + e[(k-2)T. \tag{4.11}$$

Po dosazení a úpravě pak získáme konečný tvar PSD regulátoru

$$u(kT) = u[(k-1)T] + q_0 e(kT) + q_1 e[(k-1)T] + q_2 e[(k-2)T]\,. \tag{4.12}$$

Pomocí Z-transformace určíme přenos PSD regulátoru jako

$$G_R(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = \frac{q_0 + q_1 z^{-1} + q_2 z^{-2}}{1 - z^{-1}} \quad , \tag{4.13}$$

kde

$$\begin{aligned} q_0 &= r_0 \left(1 + \frac{T}{T_i} + \frac{T_D}{T}\right), \\ q_1 &= -r_0 \left(1 + 2\frac{T_D}{T}\right), \\ q_2 &= r_0 \frac{T_D}{T}. \end{aligned} \tag{4.14}$$

Stejným způsobem, jakým jsme od spojitého PID regulátoru přešli k diskrétnímu PSD regulátoru, můžeme přejít od spojitých na diskrétní tvary u všech ostatních regulátorů [2], [3], [4].

5 NASTAVENÍ REGULÁTORŮ

Pro správný princip funkce regulátoru v regulovaném obvodě je důležité přesné nastavení vstupních konstant, jako je r_0 (zesílení), T_i (integrační konstanta), T_d (derivační časová konstanta). Správné nastavení ovlivňuje především kvalitu regulace a stabilitu regulace. Často dochází ke kompromisu mezi rychlostí regulace a již zmíněnou stabilitou.

K nastavení regulátorů se používá mnoho optimalizačních metod. Nejpoužívanější jsou:

- Zieglerova - Nicholsova metoda přechodové charakteristiky
- Zieglerova - Nicholsova metoda kritických parametrů
- Zieglerova -Nicholsova metoda čtvrtinového tlumení
- Metoda požadovaného modelu (inverze dynamiky)
- Metoda optimálního modulu
- Metoda standardních tvarů
- Nastavení metodou pokusů a omylů

Podrobný popis jednotlivých metod obsahuje literatura [2], [3], [4], [5].

6 NÁVRH REGULÁTORU

Jak již bylo uvedeno na začátku práce, k vysokému využití sluneční energie pro ohřev teplé užitkové vody je potřeba správná regulace regulačního okruhu. K regulaci se používají komerčně vyráběné regulátory ovládající oběhové čerpadlo. Tuzemský trh nabízí především dva typy regulátorů. První z nich je jednoduchý dvoupolohový, který na základě porovnání dvou teplot spíná nebo vypíná oběhové čerpadlo. Jeho cena se pohybuje kolem 1000 Kč. Další jsou složitější sdružující v sobě kompletní regulaci složitých topných systémů obsahující např. sluneční kolektory, plynový kotel a tepelné čerpadlo. Jejich ceny se pohybují v řádu tisíců a s jejich nastavením má mnohdy problém i zkušený technik.

Pokud se někdo rozhodne pro montáž slunečních kolektorů za několik desítek tisíc korun, většinou se snaží ušetřit na regulaci a používá jednoduché dvoupolohové regulátory s jednoduchým nastavením. Je-li použito složitějšího komplexního regulátoru, velmi často se stává, že je špatně nastaven.

Z výše uvedených důvodů je cílem mé práce navrhnout složitější PSD regulátor, který bude maximálně využívat sluneční energii, bude se snadno nastavovat, komunikovat s PC, zobrazovat grafické výsledky regulace a jeho cena bude v základní verzi (bez komunikace s PC pomocí WiFi) srovnatelná s cenou dvoupolohového regulátoru.

Při srovnání spojitých a diskrétních regulátorů zjistíme, že mají stejné vlastnosti, jak bylo uvedeno výše. Mnohdy funguje spolehlivěji než klasický spojitý PID regulátor (správně nastavený). Výhoda diskrétních regulátorů spočívá hlavně v možnosti jejich snadného připojení k ostatním periferiím, jako je LCD, komunikace s PC a jednoduchá změna Firmware. Díky těmto vlastnostem převažují diskrétní regulátory nad spojitými a zde navrhovaný regulátor bude také diskrétního typu.

Při volbě typu regulátoru budeme vycházet ze základní rovnice PSD regulátoru (4.3). Zjistíme, že při dosazení některé z konstant $T_i, T_D = 0,\ r_0 = 1$, dostaneme další 4 typy regulátorů (P, S, PS, PD).

Regulátor je koncipován pro širší užití, než je jen použití v regulačním okruhu se slunečními kolektory. Tomu odpovídá i výpočet regulační odchylky (6.1) a možnost nastavení podmínky (6.2).

$$e(kT) = (w(kT) - (y(kT) + DIF)) \tag{6.1}$$

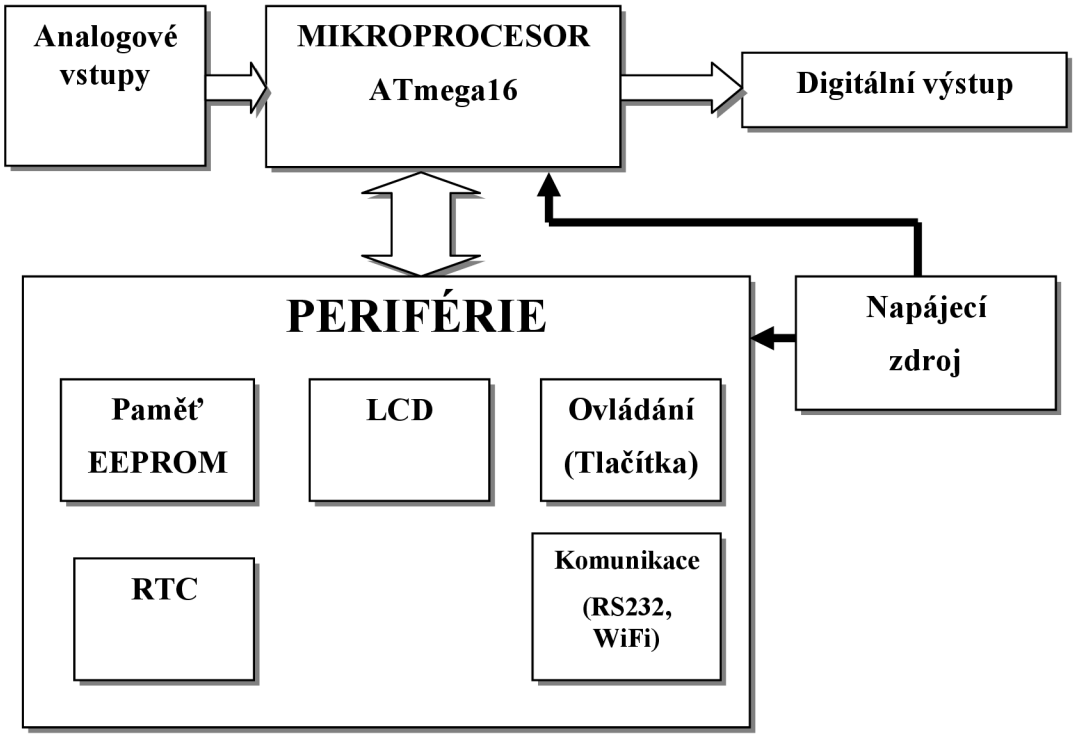
$$y(kT) \leq max_{tep}\ , \tag{6.2}$$

kde *DIF* je volitelná velikost diference mezi žádanou hodnotou teploty *w(kT)* a teplotou kapaliny v zásobníku *y(kT)*. Parametr max_{tep} v podmínce (6.2) je volitelná maximální možná hodnota regulované veličiny (maximální teplota vody v zásobníku teplé užitkové vody nebo bazéně). Pro soustavu se slunečními kolektory se volí hodnoty DIF = 15°C, max_{tep} = 55-60 °C.

Zapojení regulátoru v solárním systému pro ohřev vody je znázorněno na obrázku 1.1. Na vstup regulátoru zapojeny dvě teplotní čidla A a B reprezentující jednotlivé veličiny A = *w(kT)* a B = *y(kT)*. Regulátor poté na základě algoritmu ovládá oběhové čerpadlo.

7 OBVODOVÉ ŘEŠENÍ REGULÁTORU

Na obrázku 7.1 je zobrazeno blokové schéma navrhovaného regulátoru. Jednotlivé části regulátoru jsou podrobněji popsány v následujícím textu. Celkové schéma zapojení je uvedeno v příloze 1.



Obrázek 7.1 Blokové schéma regulátoru

7.1 Mikroprocesor

Hlavním jádrem regulátoru je mikroprocesor. Ten pomocí implementovaného algoritmu pracuje jako PSD regulátor. To znamená, že v sobě sdružuje ústřední a měřicí člen, vypočítává regulační odchylku a nastavuje akční člen na patřičnou velikost regulačního zásahu. Mikroprocesor také komunikuje s ostatními periferiemi, jako jsou displej a obvod reálného času (RTC). Stará se o komunikaci regulátoru s uživatelem přes PC a ukládá naměřené hodnoty regulované a žádané hodnoty (teplota na solárních panelech a v zásobníku TUV) do externí paměti EEPROM.

Na trhu se dnes nachází mnoho typů mikroprocesorů s různými parametry a od různých firem. Při výběru mikroprocesoru byl kladen především důraz na jeho základní vlastnosti potřebné pro správné fungování regulátoru (počet A/D převodníků, taktovací frekvence, počet I/O portů, ajn.). Nakonec byl zvolen mikroprocesor firmy Atmel ATmega16.

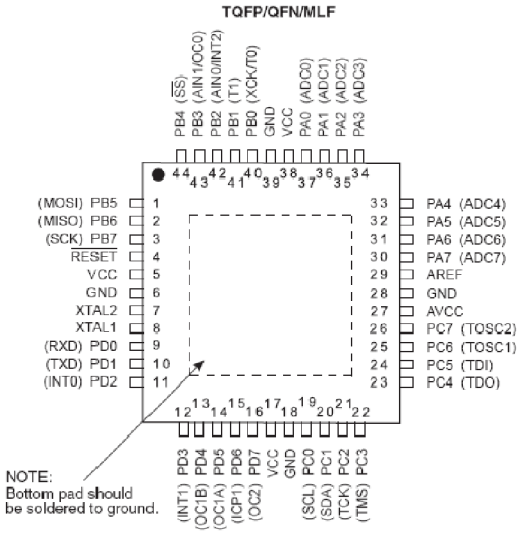
7.1.1 Základní vlastnosti mikrokontroléru ATmega16

- Mikroprocesor obsahuje čtyři 8bitové vstupně/výstupní porty,
- hodinový kmitočet až 16 MHz (použito 16MHz),
- flash paměť programu o velikosti 16kB,
- datová paměť RAM kapacity 1kB,
- datová paměť EEPROM kapacity 512B (uchování hodnot nastavení regulátoru),
- programování pomocí SPI a JTAG (programování přímo v systému – možnost změny Firmware, použito SPI),
- dva 8bitové čítače/časovače (volba velikosti periody vzorkování regulátoru),
- 10bitový A/D převodník řízený multiplexorem (využity 4vstupy),
- jednotky USART a TWI (komunikace s RTC, EEPROM a PC)
- obsluhu přerušení od externích zdrojů (periodické přerušení od RTC k automatickému uložení dat)
- jednotku WDT a Power-on reset.

Pro navrhovaný regulátor byl použit mikroprocesor v pouzdře TQFP 44 jehož cena se pohybuje kolem 80 Kč. Na obrázku 7.2 ukázáno rozložení vývodů mikroprocesoru v pouzdře TQFP 44.

Jedním z mnoha důvodů výběru byla také snadná zaměnitelnost s mikroprocesorem ATmega32, jenž má větší paměť programu (32 kB) a stejné rozložení vývodů jako ATmega16. V případě rozšíření programu na velikost větší než je 16 kB stačí tedy pouze vyměnit typ mikroprocesoru a zaměnit hlavičkový soubor v napsaném programu.

Bližší a podrobnější informace o mikroprocesoru ATmega16 lze nalézt v [8] a [9].



Obrázek 7.2 Rozložení vývodů mikroprocesoru ATmega16 v pouzdře TQFP 44 (převzato z [8])

7.1.2 Zapojení mikroprocesoru

Na obrázku 7.3 je zobrazeno schematické zapojení mikroprocesoru použitého v regulátoru PSD.

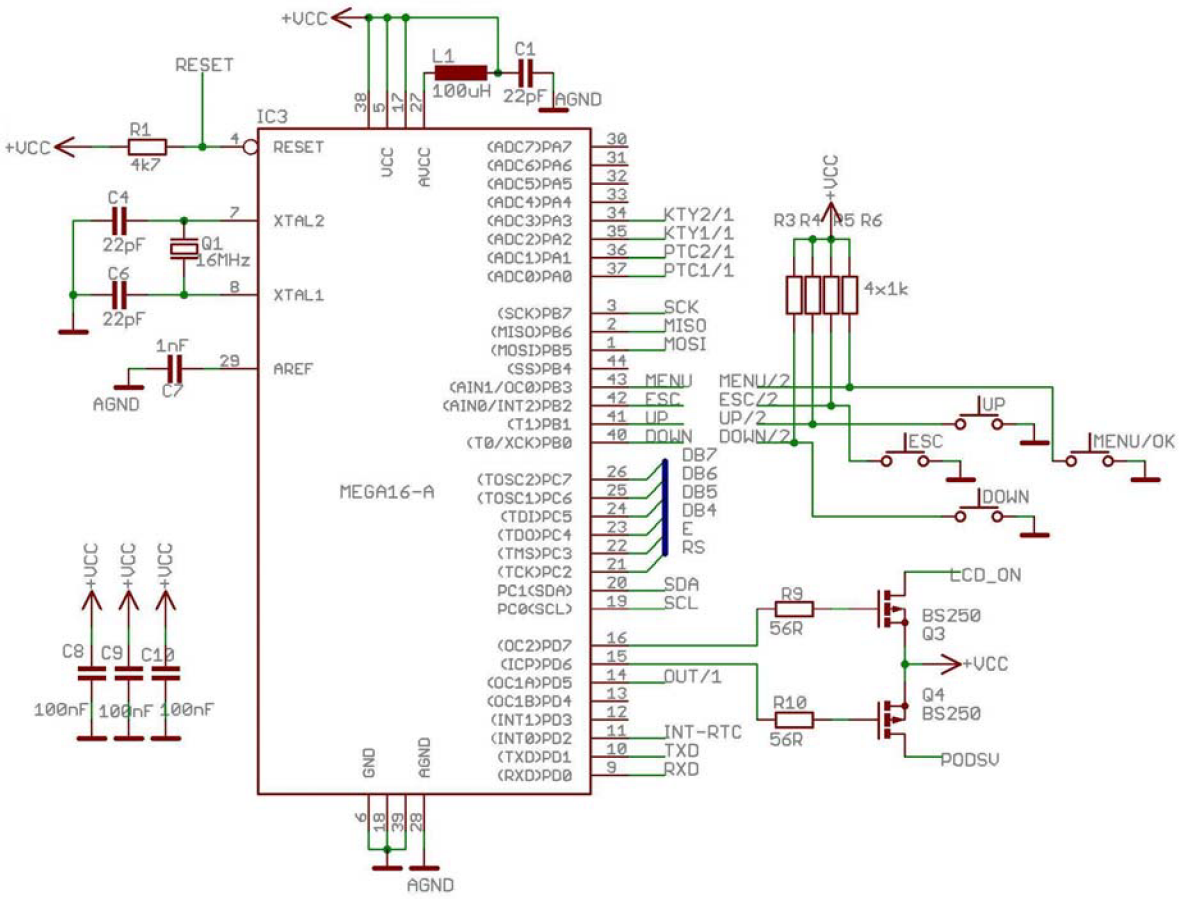
Základní zapojení mikroprocesoru vychází z katalogového listu [8]. Mikroprocesor ATmega16 obsahuje 3 páry digitálních napájecích vstupů VCC a GND. Ke každému páru je připojen jeden blokovací kondenzátor (C8,C9,C10). Pro napájení analogově-digitálního převodníku slouží zvláštní napájecí pár, piny AVCC a AGND. Napájecí napětí A/D převodníku musí být v rozmezí ±0,3V VCC. Analogová zem se doporučuje připojit k digitální pouze v jednom místě.

Velikost referenčního napětí převodníku se volí programově. Mikroprocesor má tři možnosti výběru referenčního napětí.

1) Velikost napětí na vývodu AREF
2) Napájecí napětí AVCC (na vstup AREF je nutné připojit blokovací kondenzátor)
3) Vnitřní reference 2,56V(na vstup AREF je nutné připojit blokovací kondenzátor)

V zapojení regulátoru je z důvodu menšího rušení použita vnitřní reference s velikostí 2.56V. Na vývod AREF je připojen blokovací kondenzátor C7.

Jako výchozí zdroj hodin byl zvolen vnější krystal s taktovací frekvencí 16MHz s připojenými vnějšími blokovacími kondenzátory C4 a C6.



Obrázek 7.3 Zapojení mikroprocesoru ATmega16

Jelikož mikroprocesor slouží jako hlavní jádro celého regulátoru, jsou na jeho vstupně-výstupní vývody připojeny všechny externí periférie.

- PD0, PD1 : Jednotka USART, ke které je připojen modul WiFi.
- PD5 : Výstup regulátoru (akční veličina).
- PD6, PD7 : Zapnutí LCD displeje a jeho podsvícení. Jako spínací prvek byl zvolen, vzhledem k jeho parametrům tranzistor P-MOS.

- PC0,PC1 : Komunikace I2C
- PC2-PC7 : Ovládací výstupy LCD displeje
- PB0-PB3 : Mikrospínače sloužící k ovládání regulátoru. Ke každému z nich je připojen pull-up rezistor (R3-R6)
- PB5-PB7 : Rozhraní SPI pro naprogramování mikroprocesoru
- PA0-PA5 : Vstupy AD převodníku

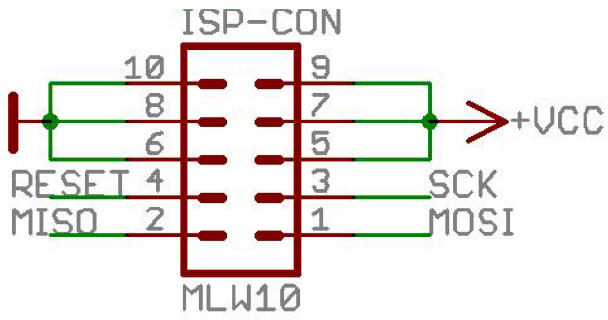
7.1.3 Programování mikroprocesoru

Nahrát program do mikroprocesoru lze několika způsoby. Klasický způsob, který se v dnešní době moc nepoužívá, je paralelní programování. Dalším způsobem, který mikroprocesor podporuje je JTAG. Pomocí rozhraní JTAG lze ladit program přímo na desce. Bohužel softwarová a hardwarová podpora JTAG programátoru pro funkci ladění je velice značná, proto se ceny programátoru pohybují v řádech tisíců korun a pro běžného uživatele nejsou cenově dostupné. Nejběžnější způsob programování probíhá pomocí SPI rozhraní (sériový download).

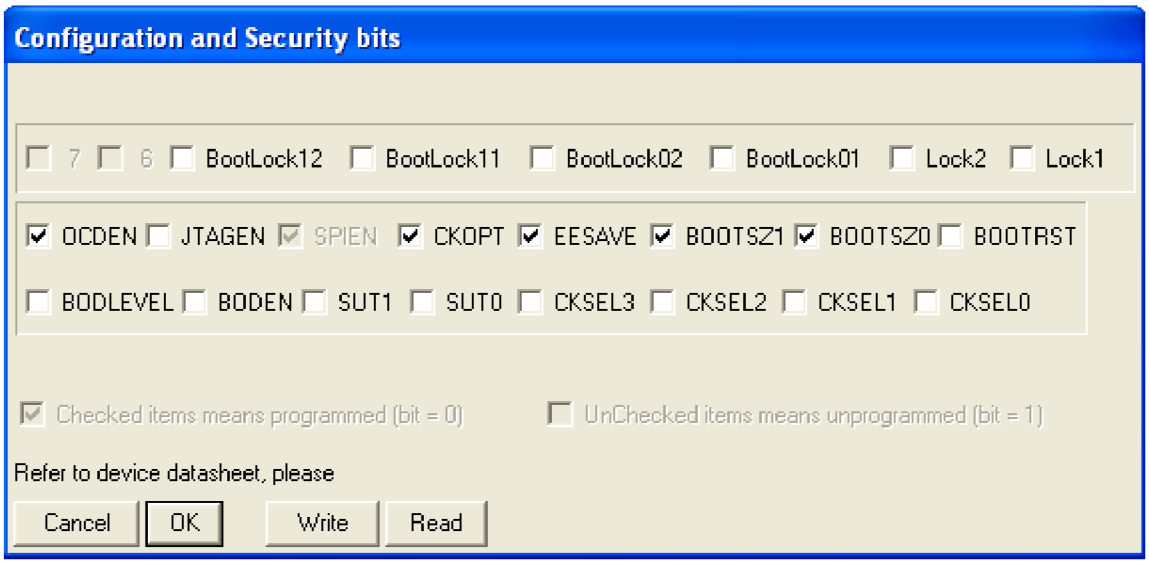
Sériový download

Jde o pokročilou metodu programování, jenž umožňuje programovat mikroprocesor přímo v aplikaci. Pro tuto metodu jsou nutné čtyři signály. Signál RESET určuje, zda je možné programovat. Programování probíhá, když je RESET nastaven na logickou 0. Hodinový signál dodává signál SCK. Pro vstup dat slouží signál MOSI a pro výstup MISO. Více informací o sériovém downloadu lze získat v [9].

Pro naprogramování mikroprocesoru byl používán programátor PONY-PROG, který podporuje sériový download. Metoda programování mikroprocesoru regulátoru byla tedy zvolena pomocí rozhraní SPI. Na obrázku 7.4 je znázorněno zapojení konektoru pro programování pomocí sériového downloadu. Nastavení programovatelných pojistek je zobrazeno na obrázku 7.5.



Obrázek 7.4 Zapojení konektoru SPI



Obrázek 7.5 Nastavení programovatelných pojistek mikroprocesoru

7.2 Analogové vstupy

Analogové vstupy slouží pro připojení teplotních čidel A a B zapojených v solárním systému pro ohřev vody podle obrázku 1.1. Mikroprocesor pomocí integrovaného 10bitového A/D převodníku převádí velikosti napětí teplotních čidel na diskrétní veličiny *y(kT)*, *w(kT)* a dále s nimi pracuje.

7.2.1 Teplotní senzory

V současné době je na našem trhu k dostání spousta teplotních senzorů pracujících na různých fyzikálních principech. Rozdělení teplotních senzorů můžeme posuzovat z různých hledisek. Hlavní rozdělení může být na senzory dotykové a bezdotykové. Dotykové senzory přichází do přímého kontaktu s měřenou veličinou. Dotykové senzory můžeme dále dělit podle výstupního signálu a principu snímání teploty:

- **Analogové**
  Termistor
  Termoelektrický článek
  Odporový teplotní snímač
  Křemíkový teplotní senzor

- **Digitální**
  Převod teploty na digitální hodnotu

- **Mechanické**
  Bimetalový teploměr

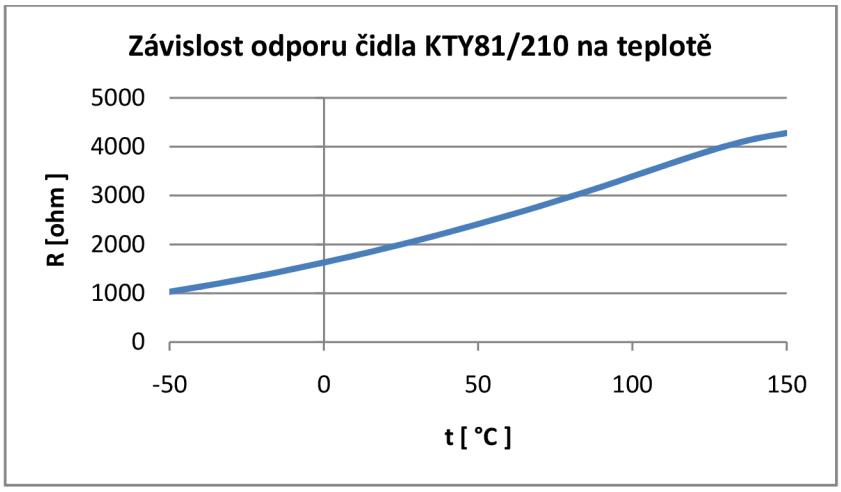
Výběr teplotních čidel proto mnohdy závisí na druhu měřené soustavy, způsobu použití čidel, výstupu teplotního senzoru, přesnosti, dostupnosti a ceně.

Pro výběr typů čidel použitých v regulátoru pro sluneční kolektory byly kladeny tři základní podmínky. První z nich byla použití čidel v zapojení s mikroprocesorem, snadné zpracování signálu a přesnost použitých čidel. Další dvě podmínky patří k všeobecným podmínkám vyráběného regulátoru. Jsou to nízká cena a dobrá dostupnost pro všeobecnou veřejnost. Vzhledem k praktickým znalostem používaných čidel v regulační technice byly nakonec vybrány dva typy čidel. První z nich splňuje podmínky nízké ceny a snadné dostupnosti. Jedná se o polovodičový křemíkový teplotní senzor KTY 81/210. V technické praxi se však častěji setkáváme s platinovými odporovými senzory teploty typu PT100. Tyto senzory se volí především z důvodu jejich vysokého rozsahu (-100°C - +800°C) a snadnému zpracování signálu (lineární průběh). Bohužel cenově vychází mnohem dráž, než polovodičové teplotní senzory.

V navrhovaném regulátoru si tedy uživatel bude moc vybrat, který typ čidel použije. Zda levnější polovodičový senzor KTY 81/210, nebo dražší platinový senzor PT100. Při výběru však musí použít obě čidla (A, B) stejné. Nelze použít pro snímání teploty na výstupu solárního kolektoru jeden typ a na výstupu výměníku druhý typ.

7.2.2 Křemíkové teplotní senzory KTY81 /210

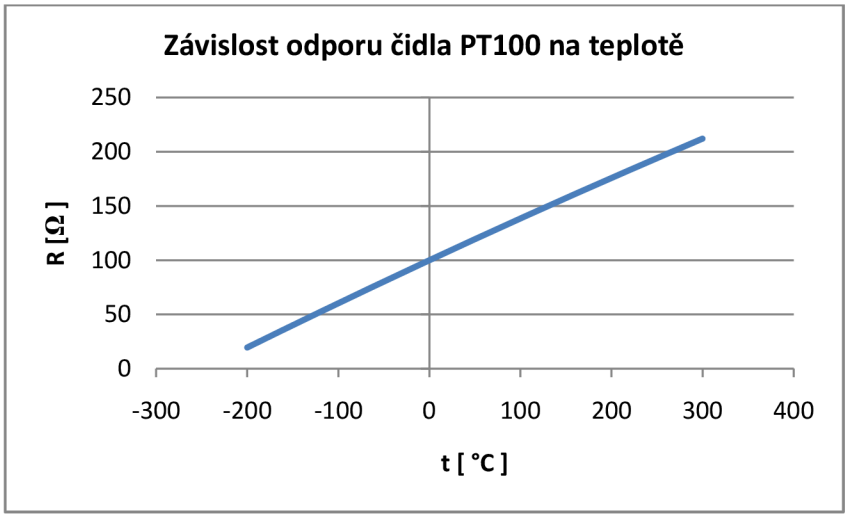
Velmi často se v průmyslové praxi používají sériově vyráběné monokrystalické senzory teploty. Senzory řady KTY využívají jako polovodič křemík (Si). Teplotní závislost rezistivity křemíku je v daném rozsahu senzoru (-50 °C až +150 °C) dána teplotní závislostí pohyblivosti nosičů. Zvyšující se teplotou dochází ke zmenšování pohyblivosti těchto nosičů a narůstá rezistivita. Nevýhodou polovodičů je ovšem nelineární průběh závislosti odporu na teplotě. Ta nám v případech s malou přesností čidla nemusí vadit. Pro zvětšení přesnosti musíme nelineární průběh (obrázek 7.6) linearizovat paralelním, sériovým odporem nebo programově. Výhoda použití čidel řady KTY je snadná dostupnost a nízká cena.



Obrázek 7.6 Závislost odporu čidla KTY 81/210 na teplotě

7.2.3 Odporové teplotní senzory PT100

Principem odporových kovových čidel je teplotní závislost odporu kovu. Pro čidla PT 100 je tímto kovem platina. Platina se vyznačuje chemickou netečností, časovou stálostí a vysokou teplotou tání. Hodnota 100 v označení senzoru označuje velikost odporu při 0°C (100 Ω). Teplotní čidla PT100 se vyrábějí ve dvou tolerančních třídách dle doporučení IEC-751. Třída A je stanovena pro rozsahy teplot od -200 °C do 650 °C a třída B pro rozsah teplot -200 °C až 850 °C. Velikou výhodou teplotních senzorů PT100 je téměř lineární průběh (Obrázek 7.7) v rozsahu 0°C až 200°C, což v případě snímání teploty v regulované soustavě se slunečními kolektory plně dostačuje. Více informací o odporových teplotních čidlech lze získat v literatuře [10].

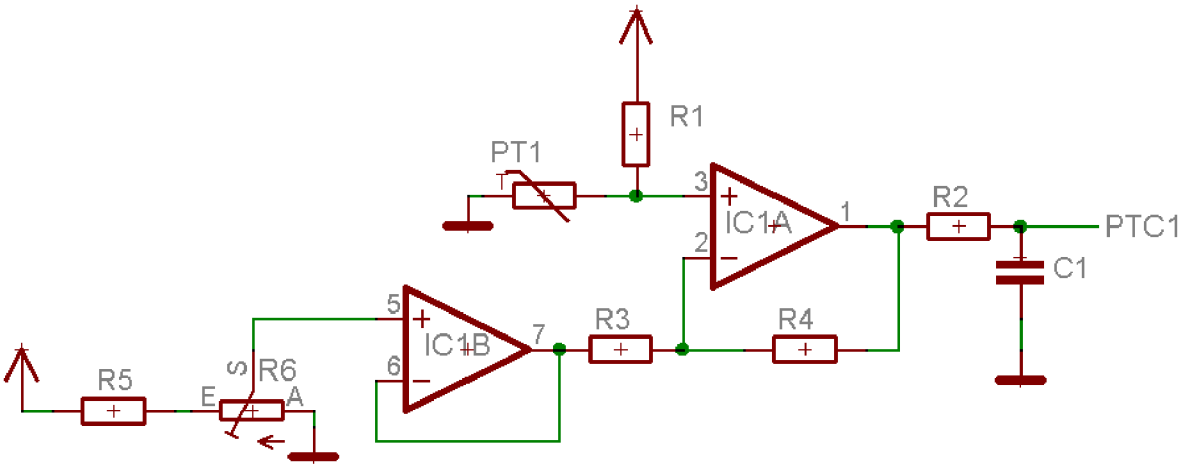


Obrázek 7.7 Závislost odporu čidla PT100 na teplotě

7.2.4 Zapojení teplotních senzorů v obvodu regulátoru

Na obrázku 7.8 je vidět schéma připojení teplotního senzoru k A/D převodníku mikroprocesoru. Vzhledem k tomu, že není potřeba příliš velké přesnosti teplotních čidel, jsou čidla připojené klasickou dvouvodičovou metodou. Eliminace odporu přívodních vodičů, která vzniká při můstkovém čtyřvodičovém připojení čidel, je vyřešena softwarově v programu mikroprocesoru.

Hlavní myšlenka připojení teplotních čidel tedy vychází z můstkového zapojení. Odporem R1 je nastaven maximální protékající proud teplotním čidlem. Tento proud nemůže být velký, aby nevznikalo při průchodu čidlem teplo, které by ovlivňovalo měření a vnášelo do něho nepřípustnou chybu. Doporučená hodnota proudu pro obě čidla se pohybuje kolem 1mA. Teplotní čidlo je připojené na precizní nízkošumový operační zesilovač TLC 272, který je zapojen jako rozdílový zesilovač. Na rozdílový vstup zesilovače je zapojen napěťový dělič s impedančním přizpůsobením sloužící pro nastavení offsetu.



Obrázek 7.8 Zapojení vstupního obvodu teplotních čidel PT100

Teplotní čidla KTY 81/210 pracují spolehlivě do teploty 150 °C. V systému solárních kolektorů je tato hodnota dostačující (teplota se pohybuje maximálně kolem 100 °C), proto je zvolena maximální zpracovatelná teplota 150 °C i pro senzory PT100.

Integrovaný A/D převodník mikroprocesoru má jako referenční hodnotu nastaven vnitřní referenční zdroj o velikosti 2,56 V. Výstup operačního zesilovače (dále jen OZ) nesmí při maximální velikosti teploty tuto hodnotu překročit. Vzhledem k toleranci pasivních součástek je lepší maximální napětí výstupu OZ zvolit o několik mV menší z důvodu jisté rezervy. Pokud bychom se dostali nad hodnotu referenčního zdroje A/D převodníku, převodník by nám tuto teplotu již nevyhodnocoval a měření by bylo neefektivní.

Velikost napětí dané zesílením OZ je určeno velikostí kombinace rezistorů zařazených v záporné zpětné vazbě OZ. Velikost zesílení určuje vztah

$$Au = 1 + \frac{R4}{R3}. \tag{7.1}$$

Při teplotě 0 °C má čidlo PT100 odpor 100Ω a požadujeme, aby byl výstup OZ roven nule, nebo nejbližší možné hodnotě napětí. Do zapojení proto musíme zavést tzv. offset (virtuální nulu). Pro její nastavení slouží odporový dělič sestavený z rezistoru R5 a trimru R6, zapojený přes impedanční přizpůsobení tvořené druhým OZ (IC1B). Nastavením děliče je vytvořena na invertujícím vstupu diferenčního zesilovače (IC1A) hodnota napětí odpovídající úbytku napětí na čidle při teplotě 0 °C. Pro přesné naladění odporového děliče slouží víceotáčkový trimr R6.

Pro maximální velikosti teploty (150 °C) má čidlo PT100 hodnotu odporu 157,33 Ω. Hodnota odporu R1, který je s čidlem v sérii je 3000 Ω. Pomocí vzorců vypočítáme úbytek napětí při minimální teplotě (7.2) a při maximální teplotě

$$U_{PT\,[0]} = VCC\left(\frac{R_{t=0}}{R_{t=0}+R1}\right) = \left(\frac{100}{100+3000}\right) = 0{,}161V, \tag{7.2}$$

$$U_{PT\,[150]} = VCC\left(\frac{R_{t=150}}{R_{t=150}+R1}\right) = \left(\frac{157{,}32}{157{,}32+3000}\right) = 0{,}249V. \tag{7.3}$$

Velikost napětí offsetu je tedy $U_{offset}=U_{PT[0]}$.

Po odečtení velikosti napětí offsetu od velikosti napětí při 150°C získáme maximální hodnotu napětí čidla, která po vynásobení zesílením OZ nesmí překročit velikost napětí referenčního zdroje

$$U_{max} = \left(U_{PT\,[150]} - U_{offset}\right) = 0{,}249 - 0{,}161 = 0{,}088V, \tag{7.4}$$

$$U_{ref} > U_{max} \,.\, A \,. \tag{7.5}$$

Zesílení OZ je poměr mezi jeho výstupním a vstupním napětím, proto budeme vycházet ze vztahu

$$\begin{aligned} &U_1 \,.\, A = U_2 \,, \\ &U_{max} . A + U_{offset} = \; U_2 \,, \\ &0{,}088 . A + 0{,}161 = 2{,}56V \;\; . \end{aligned} \tag{7.6}$$

Po dosazení je zesílení:

$$A = 27{,}26$$

Při zvolení správné hodnoty rezistoru R4 a za pomocí vzorce (7.1) jsme pak schopni vypočítat velikost zpětnovazebního odporu R3.

$$\begin{aligned} &A = 1 + \frac{R4}{R3} \,, \\ &27{,}26 = 1 + \frac{300000}{R_3} \,, \\ &R_3 = \frac{300000}{27{,}26-1} = 11{,}4k\Omega \;\; . \end{aligned} \tag{7.7}$$

V řadě E24 jsou nejbližší hodnoty odporu R4 = 300 kΩ, R3 = 12kΩ . Po zpětném přepočtu dle vztahu (7.1) bude vycházet reálné zesílení OZ A = 25 a výstupní napětí měřicího zesilovače při maximální měřené teplotě:

$$\begin{aligned} &U_1 . A = U_2 \;\; , \\ &U_{max} . A + U_{offset} = \; U_2 \;\; , \\ &0{,}088.25 + 0{,}161 = U_2 \;\; , \\ &U_2 = 2{,}36V \;\; . \end{aligned} \tag{7.8}$$

To znamená, že při teplotě 150 °C bude napětí na výstupu OZ 2,36 V a podmínka (7.5) bude splněna.

Podle vztahu (7.2) platí, že pro vytvoření virtuální nuly je potřeba přivést na invertující vstup napětí $U_{offset} = U_{PT[0]}$. Vzhledem k přesnosti nastavení je požadováno, aby na trimru R6 byl maximální úbytek napětí 250 mV a zbylé napětí bylo na odporu R5. Z řady hodnot víceotáčkových trimrů byl vybrán trimr s hodnotou odporu 1 kΩ a rezistor R5 s hodnotou 20 kΩ. Nastavením odporového děliče bylo zajištěno, že na výstupu odporového trimru bude napětí v rozmezí 0 -240 mV a pokud bude použit 20ti otáčkový trimr, odpovídá jedné otáčce

změna napětí kolem 12 mV. Nastavit offset lze tedy velice přesně.

Zapojení teplotních senzorů KTY 81/210 je totožné se zapojením pro teplotní čidla PT100. Vzhledem k rozdílným hodnotám odporů při minimální a maximální teplotě, oproti čidlům PT100, muselo dojít k přepočtu zpětnovazebních rezistorů a nastavení jiného zesílení OZ. Výpočet probíhal stejným způsobem jako pro čidla PT100. Srovnání výsledků je uvedené v tabulce 7.1

Stejným způsobem by probíhal výpočet i pro jiné typy čidel. Tedy při změně typu čidla stačí vyměnit zpětnovazební odpory R3, R4 a nastavit požadovanou velikost proudu procházející teplotním čidlem změnou R1.V případě značně odlišného offsetu se však musí změnit i poměr R5 a R6.

Tabulka 7.1 Srovnání výpočtů teplotních čidel PT100 a KTY 81/210

	PT/100	KTY 81-210
R[t=0 °C] [Ω]	100	1630
R[t=150 °C] [Ω]	157,32	4280
$U_{[t=0\,°C]}$ [V]	0,161	0,168
$U_{[t=150\,°C]}$ [V]	0,249	0,417
U_{max} [V]	0,088	0,249
Au [-]	25	9,2
R3 [kΩ]	12	33
R4 [kΩ]	300	270
U2 [V]	2,36	2,46

7.3 Napájecí zdroj

Regulátor je aktivní prvek a potřebuje pro své fungování zdroj napájení. Blok napájení zajišťuje přeměnu síťového napětí na potřebnou nižší, usměrněnou a stabilizovanou velikost pro správnou funkci mikroprocesoru a ostatních prvků regulátoru.

Pro přeměnu síťového střídavého napětí (~U = 240V, f = 50Hz) na malé stejnosměrné a stabilizované napětí lze použít dva principy přeměny:

a) Spínané zdroje

Tyto napájecí zdroje v první řadě usměrní síťové napětí pomocí usměrňovacího můstku a vyhladí ho na vstupních kondenzátorech. Pomocí speciálních integrovaných obvodů a spínacích tranzistorů je spínáno o frekvenci v řádech kHz. Dále je přivedeno přes vysokofrekvenční transformátor, usměrňovač a filtrační kondenzátory na výstup zdroje. Stabilitu výstupního napětí zajišťuje zpětná vazba.

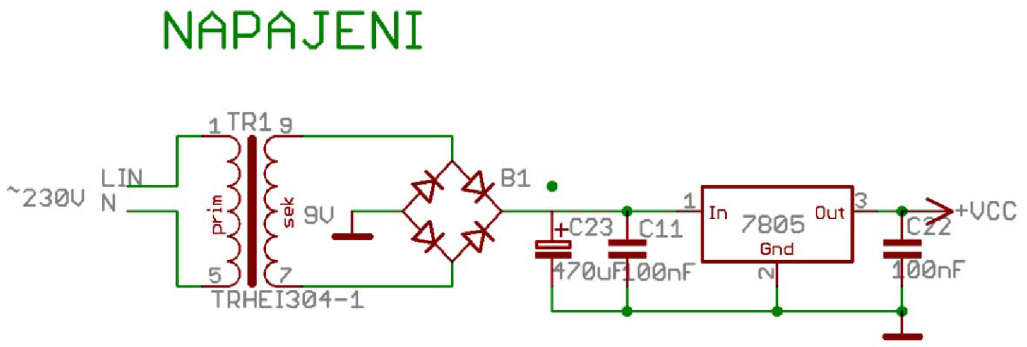
Výhodou spínaných zdrojů je malá velikost, velký výkon a vysoká účinnost. Nevýhoda je především vysokofrekvenční rušení.

b) Lineární zdroje

V lineárním napájecím zdroji je střídavé síťové napětí přivedeno na transformátor a transformováno na potřebnou nižší hodnotu napětí. To je poté usměrněno a vyhlazeno kondenzátory. Po usměrnění a filtraci je přivedeno na lineární většinou třísvorkový stabilizátor.

Výhoda lineárních zdrojů je především v tom, že nezpůsobují žádné vysokofrekvenční rušení. Proto se s výhodou používají především v audiotechnice, ale i v jiných odvětvích elektroniky. Nevýhoda je nutnost použití velkého transformátoru a nižší účinnost (tepelné ztráty stabilizátoru).

Po zvážení všech kladů a záporů napájecích zdrojů byl nakonec zvolen pro použití v regulátoru lineární napájecí zdroj. Schéma zapojení napájecího zdroje je na obrázku 7.9. Síťové napájecí napětí je přivedeno přes transformátor, diodový můstek, filtrační kondenzátory na lineární stabilizátor 7805. Ten dodává na výstup zdroje napětí o velikosti 5V.



Obrázek 7.9 Zapojení napájecího zdroje

7.4 Analogový výstup

Analogový výstup slouží pro ovládání regulačního orgánu. V případě regulátoru solární soustavy je regulační orgán oběhové čerpadlo. Čerpadlo je spotřebič pracující na síťové střídavé napětí U = 230 V. Regulovat množství protékané kapaliny čerpadlem lze dvěma způsoby.

a) Regulace otáček

Regulace otáček probíhá přes frekvenční měnič. Vstupní hodnotou frekvenčního měniče bývá stejnosměrné napětí v rozsahu 0 až 10V. Bohužel frekvenční měniče jsou velmi drahé a většina komerčně vyráběných čerpadel (WILO, GRUNDFOS) měnič neobsahuje. I ve velkých topných systémech je regulace zaručena čerpadlem s neměnícím se výkonem a přídavným ventilem s pohonem, který změnou polohy reguluje množství protékající kapaliny. Přídavný ventil (pohon) se však pohybuje v řádech tisíců korun a cenu regulované soustavy navyšuje

b) Pulzní regulace výkonu

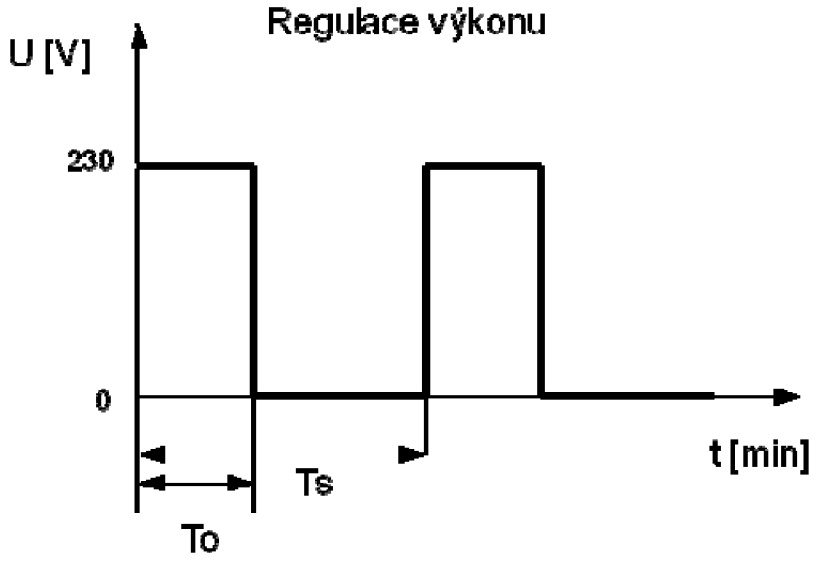
Pokud si nemůžeme dovolit předchozí řešení, lze nastavovat výkon čerpadla jeho spínáním v periodických časových okamžicích na námi zvolenou dobu, která určuje výkon čerpadla.

Např.: Perioda spínání (Ts) -každých 60 sekund

Doba sepnutí (To) - 30 sekund

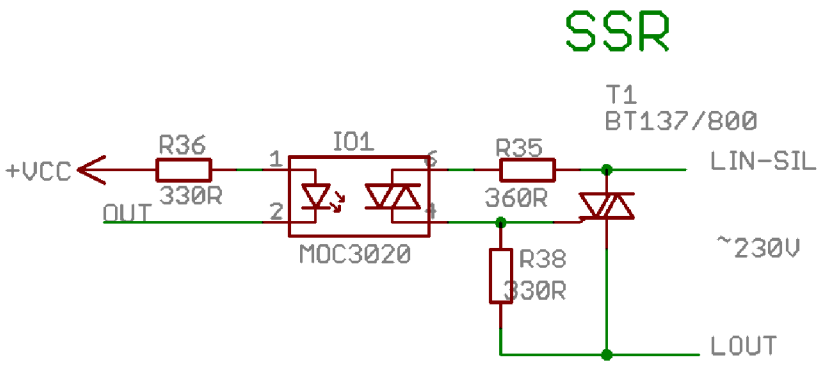
Výkon čerpadla bude: $P = \frac{T_0}{T_s} \times 100$ [%] (7.9)

Z předcházející úvahy tedy vyplívá, že bude-li se perioda spínání a doba sepnutí rovnat, čerpadlo poběží nepřetržitě a bude mýt 100% výkon. Grafická závislost průběhu napětí v závislosti na čase na výstupu regulátoru je ukázána na obrázku 7.10.



Obrázek 7.10 Průběh výstupního napětí regulátoru

Výstupní obvod regulátoru je zapojen jako opticky oddělené polovodičové relé SSR se spínáním v nule. Digitální výstup mikroprocesoru je přiveden na vstup optotriaku MOC 3041. Ten galvanicky odděluje spínací a výkonovou část obvodu. Jelikož se jedná o obvod, který spíná v nule (obvodem neteče žádný proud), nevzniká při regulaci žádné rušení. Výkonový prvek je tvořen triakem T1. Zapojení SSR vychází z výrobcem doporučeného zapojení.



Obrázek 7.11 Zapojení výstupu regulátoru

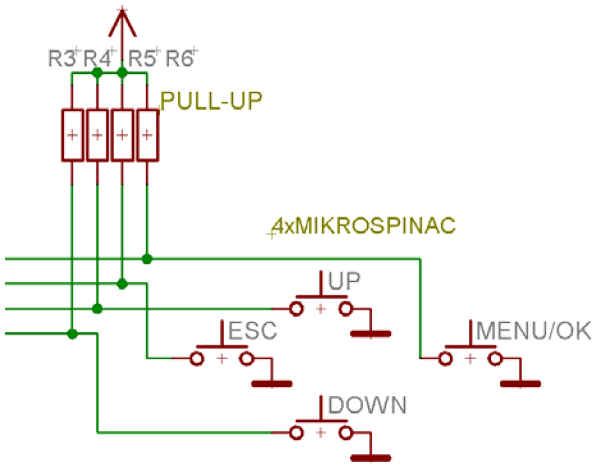
7.5 Periférie

Pro ovládání regulátoru, nastavení a zobrazení dat slouží čtyři ovládací tlačítka a LCD displej. Naměřené hodnoty se pro další zpracování a kontrolu ukládají na externí paměť.

Kontrola naměřených dat a možnost změnit nastavení regulátoru uživatelem je možná přes osobní počítač. Protože se předpokládá umístění regulátoru v hůře dostupných místech (půda, rozvaděč měření a regulace -MaR) probíhá komunikace mezi regulátorem a uživatelem pomocí bezdrátové technologie WiFi .

7.5.1 Tlačítka

Pro nastavení času, data, parametrů regulátoru atd. slouží pouze čtyři tlačítka. Dvě z nich plní funkci potvrzení a návratu (MENU/OK , ESC), další dvě slouží pro pohyb v menu a ke změně nastavovaných hodnot. Plní funkci nahoru a dolu (UP, DOWN). Pro vstup do hlavní nabídky regulátoru lze z hlavní smyčky programu vstoupit pouze pomocí tlačítka MENU.



Obrázek 7.12 Zapojení tlačítek

Zapojení tlačítek je uvedeno na obrázku 7.12. Mikrospínače jsou zapojeny přímo ke vstupním vývodům mikroprocesoru. Každé tlačítko je připojeno přes pull-up rezistory k napájecímu napětí a sepnutí mikrospínače probíhá vzhledem k nulovému napětí. Takže při stisknutí tlačítka se na vstupu mikroprocesoru objeví napětí U = 0V. Tlačítka jsou v programu mikroprocesoru ošetřena jako bezzákmitová.

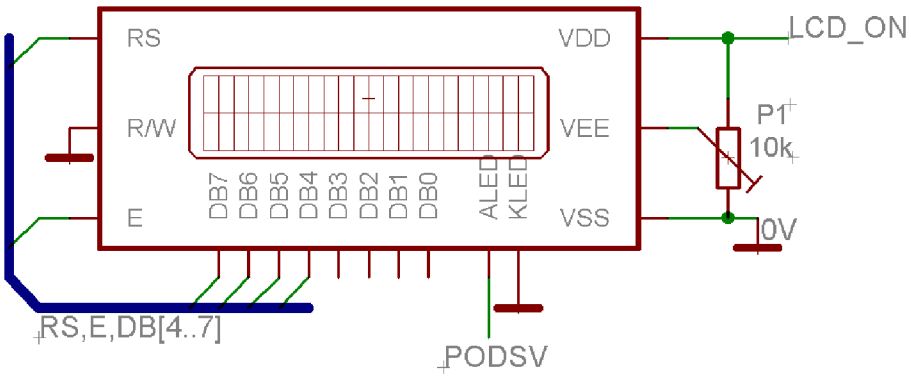
Podrobné vysvětlení funkce tlačítek pro nastavení regulátoru je uvedeno v příloze 1.

7.5.2 LCD Displej

K vizuálnímu výstupu regulátoru slouží LCD displej. Pomocí zobrazení na displeji a implementovaného algoritmu lze veškerá nastavení provádět přímo v modulu regulátoru bez použití osobního počítače (PC). Displej tedy především slouží pro zobrazení menu a proměnných parametrů regulátoru. V průběhu regulace lze také na displeji nastavit tři možnosti zobrazení. U prvních dvou možností si vybíráme mezi aktuálním časem a snímanými teplotami soustavy, třetí možnost zcela vypne displej (úsporný režim). Uživatel má dále možnost volby podsvícení displeje.

Na našem trhu je na výběr mnoho druhů displejů s různými parametry a počtem zobrazených míst. Pro regulátor byl po pečlivém zvážení možností zobrazení, velikosti ovládacího kódu, velikosti displeje, způsobu připojení a ceně jednotlivých displejů nakonec vybrán LCD displej s podsvícením MC0802A SYL/H. Displej má dva řádky a na každém z nich můžeme zobrazit 8 znaků. Velkou předností displeje je nízká cena (80 Kč) a malé rozměry (4x2cm). Jelikož je regulátor plánovaný zabudovat do krabičky s přichycením na DIM lištu pro možnost zabudování do rozvaděče MaR je velikost displeje optimální.

Zapojení LCD displeje je naznačeno na obrázku 7.13. Napájení a podsvícení displeje je řízeno přes spínací tranzistory (viz Obrázek 7.3) mikroprocesorem. Trimr P1 slouží pro nastavení jasu displeje. Pro komunikaci LCD displeje s mikroprocesorem byla zvolena čtyřbitová komunikace, kde jsou využity pouze 4 datové vodiče (DB4-DB7) a dva řídící vodiče (E, RW). Na obrázku 7.14 je vyznačen popis jednotlivých vývodů LCD displeje.



Obrázek 7.13 Zapojení LCD displeje

Pin	Symbol	Level	Description	Pin	Symbol	Level	Description
1	Vss	0V	Ground	7~14	DB0~DB7	H/L	Data Bus Line
2	VDD	+5V	Supply Voltage for Logic	15	A	--	Back Light anode:+4.2V
3	V0	--	Operating Voltage for LCD	16	K	--	Back Light cathode:0V
4	R/S	H/L	H: Data L: Instruction Code				
5	R/W	H/L	H: Data Read L: Data Write				
6	E	H,H-L	Enable Signal				

Obrázek 7.14 Popis jednotlivých pinů LCD displeje (převzato z [11])

7.5.3 Obvod reálného času

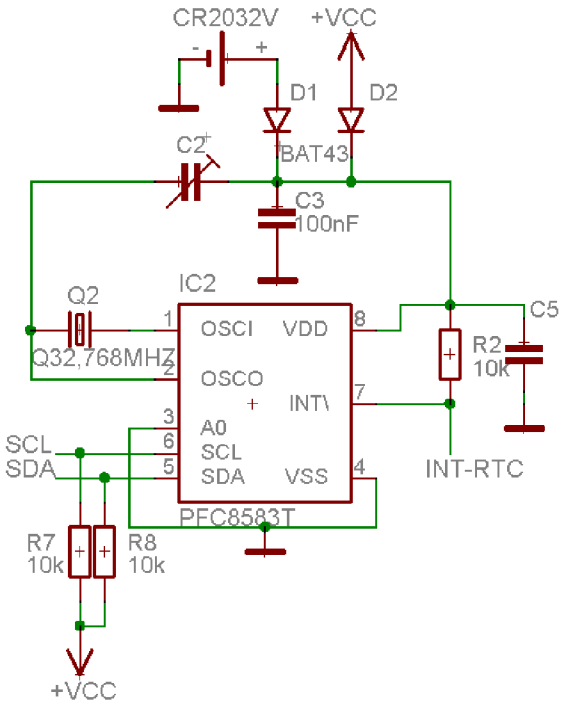
Regulátor je koncipován pro uchování naměřených dat a jejich zobrazení v PC, proto musela být do obvodu přidána možnost přiřadit uchovaným datům čas, kdy byly naměřeny. Pro zobrazení času a data slouží obvod reálného času (RTC). Z mnoha různých obvodů byl nakonec vybrán obvod reálného času PCF 8583. Tento obvod umí uchovávat a zobrazovat reálný čas a datum do roku 2099, snadno se ovládá z řídícího mikroprocesoru pomocí dvou vodičů sběrnice I2C, má nízký odběr proudu a je dostupný v každém obchodě s elektronickými součástkami za příznivou cenu.

Zapojení obvodu RTC

Základní zapojení obvodu RTC je znázorněno na obrázku 7.15 a vychází z literatury [12]. Napájení obvodu probíhá přes diodu D2. Přes diodu D1 je do obvodu RTC připojen záložní zdroj tvořený baterií s velikostí napětí U = 3,2 V. Obvod tedy pracuje a uchovává reálný čas i v době, když je regulátor vypnutý (např. výpadek napájecí sítě). Po opětovném naběhnutí sítě není potřeba znovu nastavovat čas a datum.

Hodinový kmitočet obvodu je tvořen krystalem s frekvencí 32,768 MHz. Pro přesné doladění kmitočtu je v obvodu zapojen laditelný kondenzátor C2.

Obvod RTC je k mikroprocesoru připojen třemi vodiči. První dva (SCL, SDA) slouží pro komunikaci a přenos dat po sběrnici I2C. Ke každému z nich je připojen pull-up rezistor R7 a R8. Třetí vodič (INT-RTC) určuje periodu uložení dat. Signál je opět připojen přes tzv. pull-up rezistor R2. Velká výhoda použití obvodu RTC pro získání periody uložení dat je v tom, že je perioda volitelná uživatelem v rozsahu 0 až 60 minut při minimální velikosti vytvořeného kódu v mikroprocesoru.

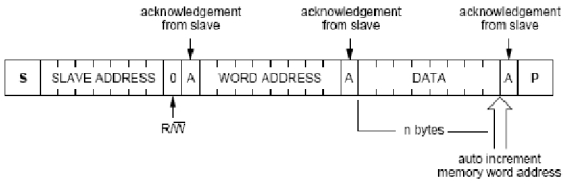


Obrázek 7.15 Zapojení obvodu RTC

Komunikace RTC s mikroprocesorem

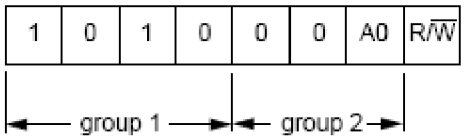
Jak již bylo napsáno, obvod RTC komunikuje s mikroprocesorem pomocí sběrnice I2C. Tato sběrnice se požívá pro vzájemné připojení více součástek (až 1024 v závislosti na parazitních kapacitách jednotlivých součástek – max. 400 pF) vyrobených pomocí různých technologií. Přenosová rychlost sběrnice se pohybuje v rozmezí 0 až 3,4 Mbit/s. Každé zařízení je na sběrnici detekováno svou jedinečnou 8bitovou adresou (1024 připojených obvodů) a může pracovat jako vysílač či přijímač. Jde tedy o sběrnici typu multi-master se zabudovanou detekcí kolizí.

Pro přenos informace se využívají dva vodiče (sériová data - SDA a sériové hodiny - SCL). Princip komunikace mezi procesorem a obvodem RTC je naznačen na obrázku 7.16.



Obrázek 7.16 Princip komunikace – mikroprocesor vysílá data a obvod RTC je přijímá (převzato z [12])

Pro identifikaci obvodu RTC na sběrnici I2C musí mít obvod jedinečnou adresu (SLAVE ADDRESS). Pro obvod RTC je tato adresa naznačena na obrázku 7.17.



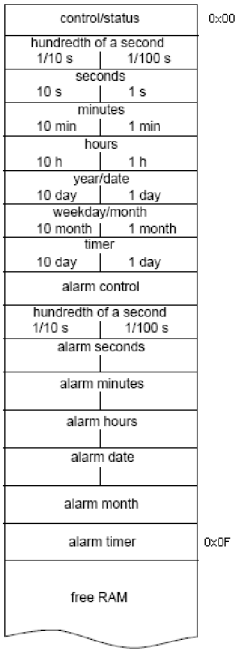
Obrázek 7.17 Adresa obvodu RTC pro identifikaci na sběrnici I2C (převzato z [12])

Šest nejvyšších bitů adresy je pevně dáno výrobcem obvodu. První nejnižší bit (R/W) určuje, zda chceme do obvodu data zapisovat, nebo z něj data číst (R=1, W=0). Druhý nejnižší bit (A0) si volí uživatel obvodu RTC (v případě regulátoru A0 = 0). Výsledná adresa obvodu bude tedy pro zápis dat 0xA0 a pro čtení dat 0xA1 (hexadecimálně).

Popis jednotlivých registrů obvodu

Obvod je tvořen 240 x 8bitovou RAM pamětí. Prvních 16 bajtů paměti slouží pro speciální registry obvodu reálného času. Zbylé bajty lze použít jako volnou RAM paměť. Pro nastavení obvodu RTC slouží především první registr s názvem CONTROL/STATUS. Zde si volíme nastavení hodinového kmitočtu, způsob použití obvodu (časový obvod/čítač) a povolení příznaku přerušení. Následujících 6 registrů je použito pro uložení aktuálního data a času. Obvod RTC se automaticky inkrementuje dle hodinového kmitočtu a přetečení nižšího registru. Dosáhne-li registr pro uchování sekund hodnotu 60, vynuluje se a registr pro uchování minut se zvýší o 1. Tímto způsobem pracuje celý obvod RTC. Následujícími registry nastavujeme přerušení od RTC. S jejich pomocí můžeme konfigurovat např. funkci budíku.

Rozsah jednotlivých registrů je znázorněn na obrázku 7.19. Podrobný popis obvodu, způsobu komunikace a jeho nastavení lze zjistit v literatuře [12].



Obrázek 7.18 Funkce jednotlivých registrů (převzato z [12])

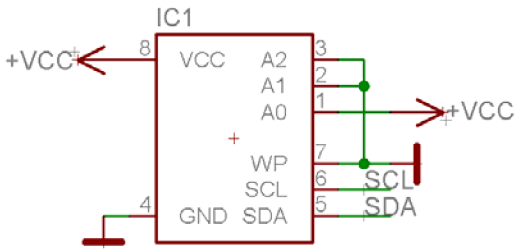
UNIT	COUNTING CYCLE	CARRY TO NEXT UNIT	CONTENTS OF THE MONTH COUNTER
Hundredths of a second	00 to 99	99 to 00	–
Seconds	00 to 59	59 to 00	–
Minutes	00 to 59	59 to 00	–
Hours (24 h)	00 to 23	23 to 00	–
Hours (12 h)	12 AM	–	–
	01 AM to 11 AM	–	–
	12 PM	–	–
	01 PM to 11 PM	11 PM to 12 AM	–
Date	01 to 31	31 to 01	1, 3, 5, 7, 8, 10 and 12
	01 to 30	30 to 01	4, 6, 9 and 11
	01 to 29	29 to 01	2, year = 0
	01 to 28	28 to 01	2, year = 1, 2 and 3
Months	01 to 12	12 to 01	–
Year	0 to 3	–	–
Weekdays	0 to 6	6 to 0	–
Timer	00 to 99	no carry	–

Obrázek 7.19 Rozsah jednotlivých registrů (převzato z [12])

7.5.4 Paměť EEPROM

Pro uchování měřených hodnot teploty regulované soustavy byla do obvodu regulátoru přidána externí sériová paměť EEPROM 24LC256 s velikostí 256Kbit (32000 x 8 bit). Zapojení paměti je ukázána na obrázku 7.20.

Paměť opět používá pro komunikaci s mikroprocesorem sběrnici I2C. Adresa obvodu je nastavena pomocí vstupních pinů A0 až A2. V našem případě je adresa obvodu pro čtení dat z paměti 0xAB a pro zápis do paměti 0xAA (hexadecimálně).



Obrázek 7.20 Zapojení paměti EEPROM

Zápis hodnot do paměti

Pro zápis dat do externí paměti s co nejlepším využitím její vnitřní paměti, byla vytvořena následující sekvence ukládání viz obrázek 7.21.

1	1	1	1	1	1	1	1
PERIODA UKLÁDÁNÍ							
ROK							
MĚSÍC							
DEN							
HODINA							
MINUTA							
SEKUNDA							
TEPLOTA T1 - jednotky							
TEPLOTA T2 - jednotky							
T1 - desetiny				T2 - desetiny			
TEPLOTA T1 - jednotky							
TEPLOTA T2 - jednotky							
T1 - desetiny				T2 - desetiny			
TEPLOTA T1 - jednotky							
TEPLOTA T2 - jednotky							
T1 - desetiny				T2 - desetiny			

Obrázek 7.21 Posloupnost ukládání dat na externí EEPROM

Na začátku sekvence je uložen řádek, jenž obsahuje samé jedničky (0xFF - hexadecimálně). V následujících bajtech se ukládají data z obvodu RTC. Je to především datum a čas prvního uloženého vzorku. Dále se ukládá perioda ukládání. Na konec sekvence se uloží jednotky první teploty, jednotky druhé teploty a v posledním bajtu se na prvních čtyřech bitech uloží desetiny první teploty a v dalších čtyřech bitech desetiny druhé teploty. Tato sekvence může být nazývána jako startovací.

Vzhledem k úspoře místa na externí paměti se v následující periodě ukládají pouze velikosti teplot. Čas ukládání si nadřazený program v PC vypočte ze startovací sekvence tak, že k času prvního uložení přičítá dobu periody ukládání. Jak je tedy patrné, jedno uložení teplot zabere tři bajty.

Díky této zkrácené sekvenci ukládání by velikost externí paměti stačila na 222 dní, pokud bychom teplotu zaznamenávali nepřetržitě každých třicet minut.

Zkrácená sekvence ukládání dat však musela být ošetřena na náhodný výpadek síťového napětí. Při výpadku by se neukládaly teploty postupně v dané periodě a vznikl by časový posun (aktuální čas se vypočítává od prvního uloženého). V tomto případě se po opětovném spuštění regulátoru uloží znovu startovací sekvence, jejíž začátek je označen právě řádkem s velikostí 0xFF.

7.5.5 Komunikační rozhraní

Pro připojení všeobecného obvodu k osobnímu počítači slouží komunikační rozhraní. Připojit obvod k PC lze několika způsoby. Nejznámější z nich jsou:

- RS-232
- USB
- ETHERNET
- WiFi

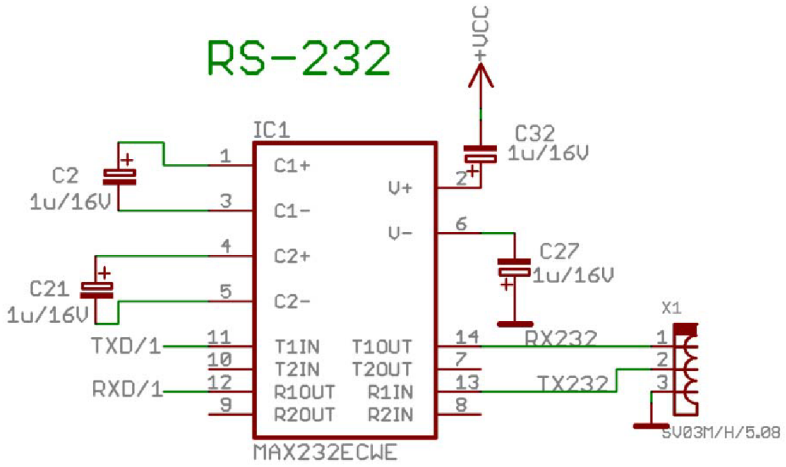
Při výběru způsobu komunikace regulátoru k PC bylo nahlíženo především k způsobům připojení, maximálním délkám vodičů a umístění regulátoru. Regulátor bude většinou umístěn v těžko dostupných místech ve větších vzdálenostech od PC. K regulátoru by proto musela vést samostatná komunikační linka pro jeho propojení s PC. To může být v některých místech značně obtížné.

V nedávné době se však na trhu objevil samostatný komunikační modul firmy Connect One, umožňující připojení zařízení k síti pomocí bezdrátové technologie WiFi 802.11b/g. Velikou výhodou modulů je, že obsahují kompletní komunikační protokoly technologie WiFi a komunikace mikroprocesoru s moduly WiFi může probíhat pomocí většiny běžných komunikačních linek.

Nevýhoda modulu je jeho značná cena (1500 Kč), která neodpovídá podmínce návrhu regulátoru postavit regulátor za minimální cenu. Po zvážení všech kladných a záporných podmínek byla nakonec vybrána komunikace pomocí bezdrátové technologie WiFi, která je však řešena v samostatném modulu jako volitelná součást zařízení. Samotný regulátor komunikuje s modulem pomocí sériové komunikace RS-232.

Sériová komunikace je jeden z nejběžnějších komunikačních standardů pro spojení mikroprocesoru s počítačem. Rozhraní používá dvě napěťové úrovně, kde logická 1 je reprezentována záporným napětím v rozsahu -3V až -15V. Logická nula je pak reprezentována kladným napětím v rozsahu +3V až +15V. Přenos informací probíhá asynchronně, pomocí pevné nastavené přenosové rychlosti a synchronizací sestupnou hranou start bitu. Formát přenosu dat se skládá z 1 start bitu, 5 až 8 datových bitů, maximálně jednoho volitelného paritního bitu, který může být vynechán a 1 nebo 2 stop bitů.

V regulátoru byl jako konvertor úrovně TTL a RS-232 použit známý obvod firmy Maxim MAX 232, který má v sobě zabudované čtyři oddělovače pro převod jednotlivých napěťových úrovní. Vyšší napájecí napětí +15V je vytvářeno pomocí nábojové pumpy. Záporné napětí je získáváno pomocí invertoru. Pro správnou funkci těchto částí je potřeby 4 kondenzátorů s kapacitou 1uF, připojených dle katalogového listu obvodu MAX 232. Zapojení obvodu v regulátoru je patrné z obrázku 7.22.



Obrázek 7.22 Zapojení obvodu RS-232

Přenosové parametry komunikace jsou v regulátoru nastaveny následovně:

- přenosová rychlost 9600 bit/s
- počet datových bitů 8
- parita žádná
- stop bit 1

Regulátor tedy může pomocí sériové komunikace komunikovat přímo s uživatelským počítačem, nebo s modulem WiFi. Záleží pouze na uživateli, pro který způsob se rozhodne. Pro možnost komunikace pomocí WiFi je již vytvořeno ovládací prostředí o kterém bude pojednáno dále. Pro přímou komunikaci s počítačem je v budoucnu plánováno vytvoření uživatelsky příjemného ovládacího prostředí.

8 KONSTRUKCE REGULÁTORU

Pro montáž regulátoru byla zvolena varianta umístění elektroniky do krabičky na DIN lištu rozvaděče MaR. Z celé řady montážních krabiček byla vybrána krabička o velikosti šesti modulů (označení v GM Electronic je U-KPDIN3). Okótovaný výkres krabičky je přiložen v příloze 2. Právě přizpůsobení rozměrům použité krabičky odpovídá i návrh desky plošných spojů. Regulátor je sestaven ze tří desek, které jsou pomocí propojovacích hřebínků umístěny vodorovně na sebe. Základní spodní deska obsahuje napájecí zdroj a vstupní obvody teplotních čidel. Druhá deska obsahuje mikroprocesor a periférní obvody. Na třetí desce plošných spojů jsou umístěny tlačítka pro obsluhu regulátoru.

Návrh schéma i desek plošných spojů probíhal v programu EAGLE 4.16. Desky plošných spojů (dále jen DPS) jsou navrhnuty jako dvouvrstvé s prokovy a kombinovanou montáží v páté konstrukční třídě přesnosti. Technologie výroby je názorně ukázána na vyplněném specifikačním listu firmy GATEMA viz obrázek 8.1.

SPECIFIKACE VÝROBY PLOŠNÉHO SPOJE

X	Nový typ spoje	Změna verze	-výrobní č. předchozí ver.:	Předch. verzi zrušit

Typ desky:		Základní materiál (výchozí):		Povrchové úpravy:	
	jednostranný	X	standard FR4 18 um Cu, 1,5 mm*		HAL olovnatý
X	oboustranný prokovený		FR4 tloušťka Cu:	X	HAL bezolovnatý
	vícevrstvý-počet vrstev:		tloušťka DPS:		chemické cínování
	Tloušťka DPS:		jiný typ		immersní zlacení
	Tolerance ±:				plošné galvanické zlacení
Otvory:		**Rozměr jednoho kusu (mm):**			galvanické Au konektorů
X	**výsledné*** **vrtané**		x		
	dovrtání	**Dělení:**		**Nepájivá maska, sítotisky:**	
	slepé		**na jednotlivé kusy**	maska, standardně zelená:	
	pohřbené	X	frézované* ostřižené	X	top barva:
	fréza před prokovením			X	bottom barva:
X	fréza po prokovení		**DPS ponechat v panelu**	potisk, standardně bílý:	
Konst. třída:			fréza na můstky		top barva:
3. 4. 5. 6. 7. 8.			drážkování		bottom barva:
	X		násobnost panelu:	Jiný sítotisk:	
Min. šířka spoje, izolační mezery:			x		top
0.2			panel opracovat na rozměr:		bottom
Násobnost výrobního přířezu:			x		
			frézovat ostřihnout	X	elektrický test

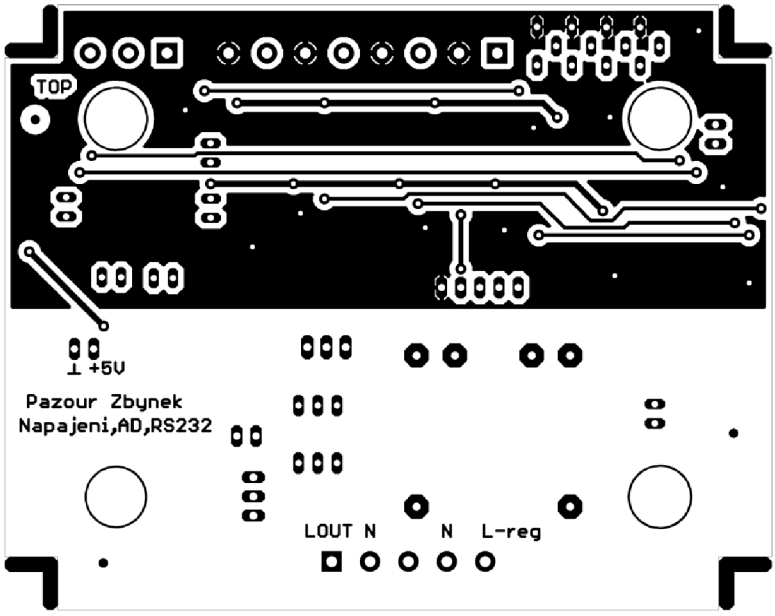
Stránka 1

Obrázek 8.1 Vyplněný specifikační list

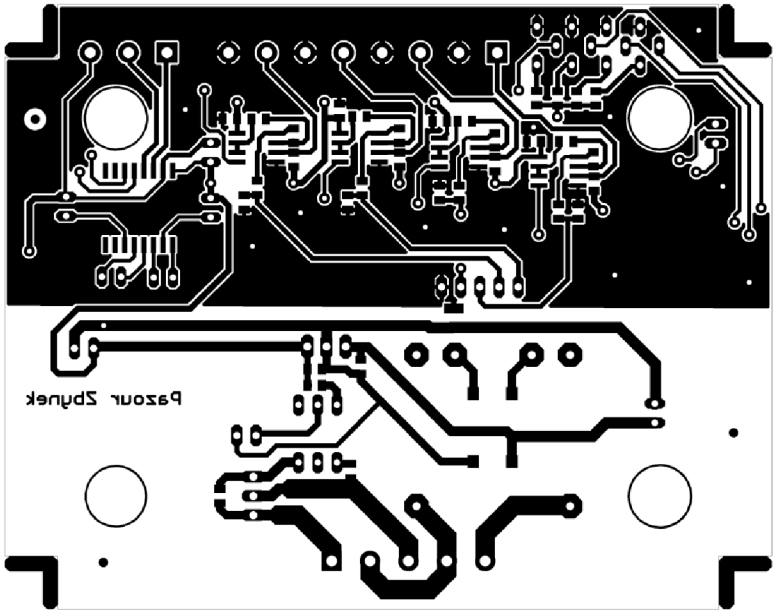
Návrh rozmístění součástek odpovídá možnosti osazení DPS pomocí osazovacího automatu a pájení vlnou. Klasické součástky jsou umístěny vždy na jedné straně DPS a SMD součástky na straně druhé. Do návrhu DPS byly umístěny i osazovací značky pro automat. Návrh DPS byl konzultován s firmou COREMA, která provádí osazení DPS.

8.1 Deska zdroje

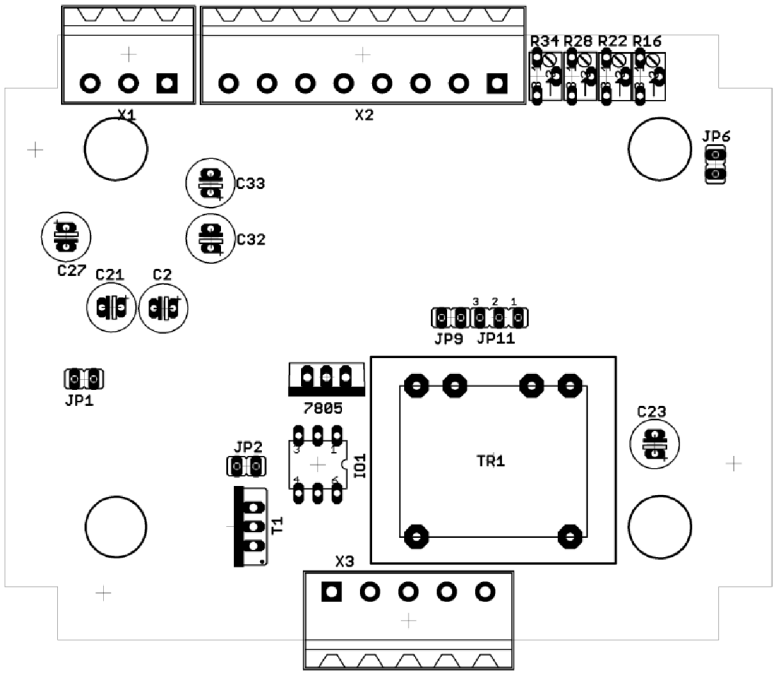
Deska plošných spojů obsahuje napájecí část a část pro úpravu vstupních signálů teplotních čidel. DPS je navrhnutá oboustranně s prokovenými otvory. Na straně spojů (BOTTOM) jsou rozmístěny SMD součástky. Na straně součástek (TOP) se nachází klasické vývodové součástky. Rozměr a tvar DPS vychází z použité krabičky. Z důvodu stínění je na DPS pro analogovou část úpravy signálu rozlitá zemnící plocha.



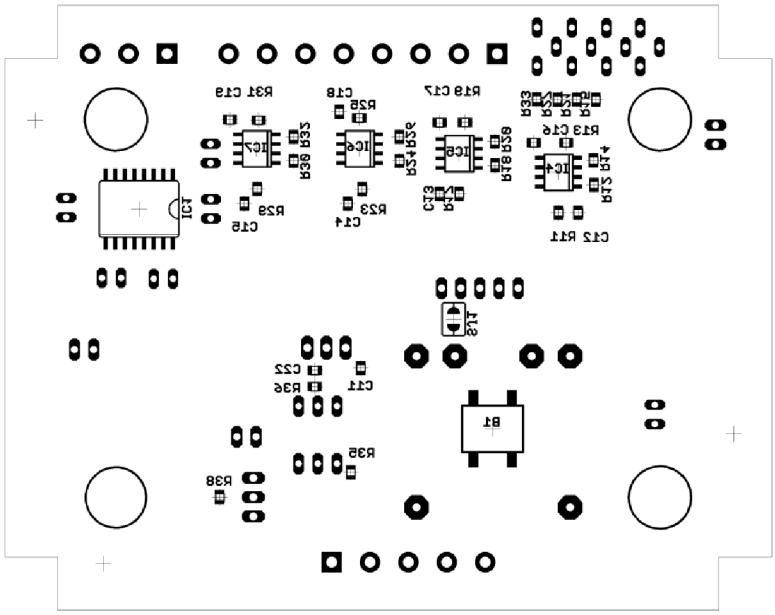
Obrázek 8.2 Kliše plošných spojů, strana TOP (měřítko 1:1)



Obrázek 8.3 Kliše plošných spojů, strana BOTTOM (měřítko 1:1)



Obrázek 8.4 Osazovací výkres, strana TOP (měřítko 1:1)



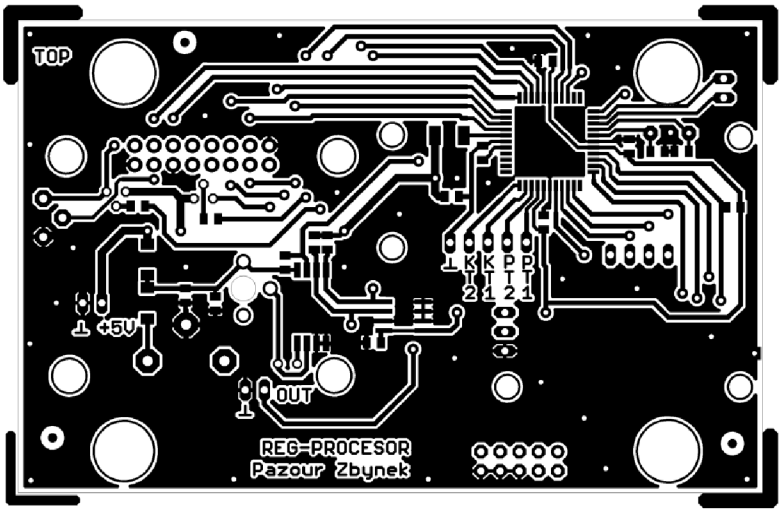
Obrázek 8.5 Osazovací výkres, strana BOTTOM (měřítko 1:1)

Tabulka 8.1 Seznam součástek desky zdroje

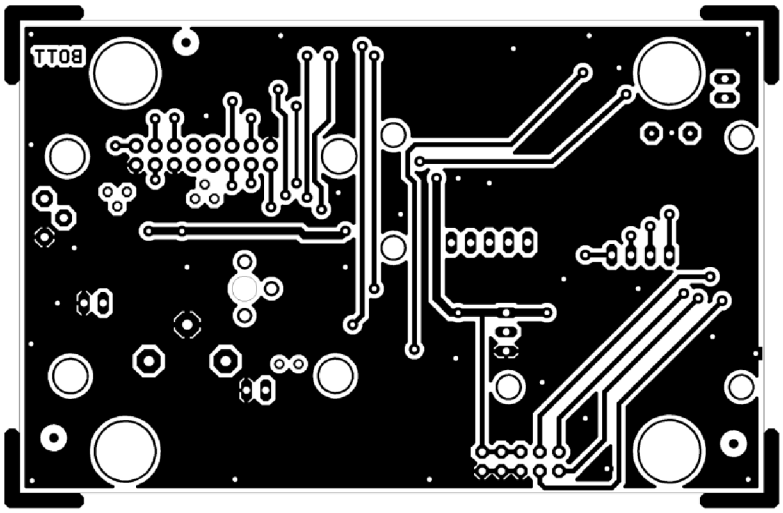
Označení	Hodnota	Popis	Pouzdro	Počet
Rezistory				
R36,38	330R	Rezistor	0805	2
R35	360R	Rezistor	0805	1
R24,30	3k	Rezistor	0805	2
R11,17,23,29	4K7	Rezistor	0805	4
R25,31	12k	Rezistor	0805	2
R13,19	33k	Rezistor	0805	2
R12,18	47k	Rezistor	0805	2
R14,20	270K	Rezistor	0805	2
R26,32	300k	Rezistor	0805	2
R16,22,28,34	1K	Trimr-víceotáčkový	64Y	4
Kondenzátory				
C11-19,22	100nF	Keramický kondenzátor	0805	10
C2,21,27,32,33	1uF/16V	Elektrolytický kondenzátor	RM 2,5	5
C23	470uF/50V	Elektrolytický kondenzátor	RM 2,5	1
Integrované obvody				
IC1	MAX232ECWE		SO16	1
IC4,5,6,7	TLC272		SO8	4
IO1	MOC3040	Optotriak	DIL6	1
7805	7805	Lineární stabilizátor	TO-220	1
Ostatní				
B1	B40S	Usměrňovací můstek	MiniDIL	1
T1	BT 137/800	Triak	TO-220	1
TR1	TRHEI304-1X9	Transformátor 1x9V		1
X1	SV03M/5,08	Násuvná svorkovnice 90°		1
X2	SV05M/5,08	Násuvná svorkovnice 90°		1
X3	SV08M/5,08	Násuvná svorkovnice 90°		1

8.2 Deska mikroprocesoru a periferií

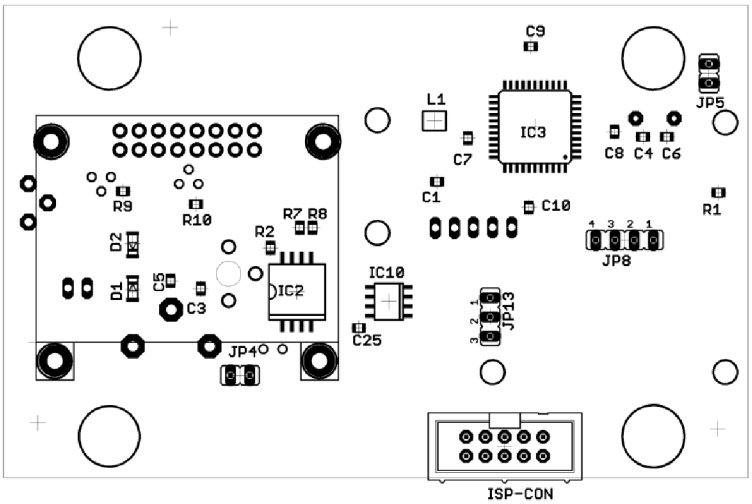
Deska plošných spojů obsahuje hlavní jádro regulátoru, které tvoří mikroprocesor a periférní obvody. DPS je navrhnutá oboustranně s prokovenými otvory. Na straně TOP jsou rozmístěny SMD součástky a na straně BOTTOM vývodové součástky.



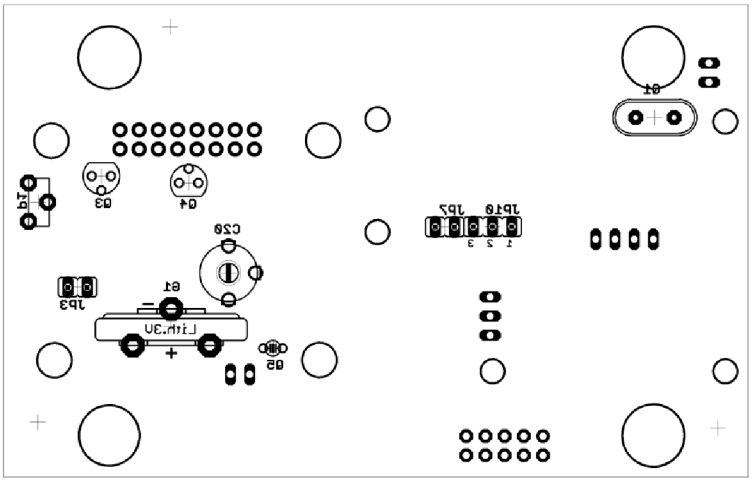
Obrázek 8.6 Kliše plošných spojů strana TOP (měřítko 1:1)



Obrázek 8.7 Kliše plošných spojů strana BOTTOM (měřítko 1:1)



Obrázek 8.8 Osazovací výkres, strana TOP (měřítko 1:1)



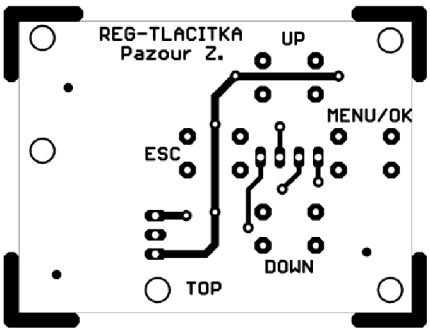
Obrázek 8.9 Osazovací výkres, strana BOTTOM (měřítko 1:1)

Tabulka 8.2 Seznam součástek desky mikroprocesoru

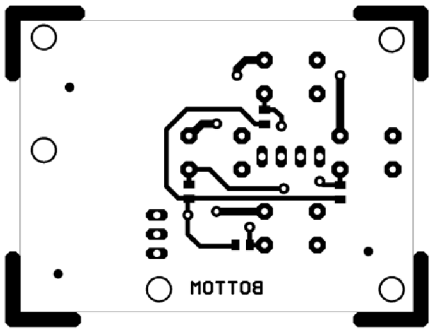
Označení	Hodnota	Popis	Pouzdro	Počet
Rezistory				
R2	12k	Rezistor	0805	1
R1	4k7	Rezistor	0805	1
R7,8	10k	Rezistor	0805	2
R9,10	56R	Rezistor	0805	2
P1	1k	Trimr stojatý 10mm		1
Kondenzátory				
C1,4,6	22pF	Keramický kondenzátor	0805	3
C3,5,8,9,10,25,	10nF	Keramický kondenzátor	0805	6
C7	1nF	Keramický kondenzátor	0805	1
C20	5-35pF	Laditelný kondenzátor		1
Integrované obvody				
IC2	PCF8583	Obvod RTC	SO8	1
IC10	24LC256SN	Paměť EEPROM	SOIC8	1
IC3	ATmega16	Mikroprocesor	TQF44	1
Ostatní				
D1,2	BAT43	Dioda	SOD80	2
L1	100uH	Tlumivka	TL.SMT54	1
Q1	16MHz	Krystal RTC		1
Q5	32,768kHz	Krystal RTC		1
Q3,Q4	BS250	Tranzistor		2
G1	CR2032	Záložní baterie RTC		1
U$1	DMC 2x8	LCD display 2x8 znaků		1
ISP-CON	MLW10	Programovací konektor	MLW-10G	1

8.3 Deska tlačítek

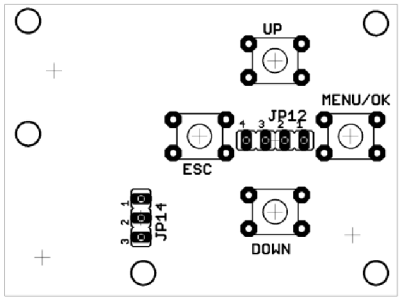
DPS tlačítek slouží pouze pro správné výškové umístění ovládacích tlačítek. Obsahuje čtyři mikrotlačítka a 4 pull-up rezistory. Deska je opět vytvořena oboustranně s prokovy.



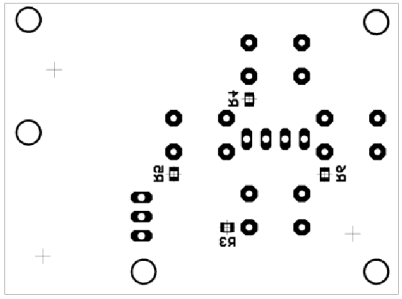
Obrázek 8.10 Klišé plošných spojů strana TOP (měřítko 1:1)



Obrázek 8.11 Klišé plošných spojů strana BOTTOM (měřítko 1:1)



Obrázek 8.12 Osazovací výkres, strana TOP (měřítko 1:1)



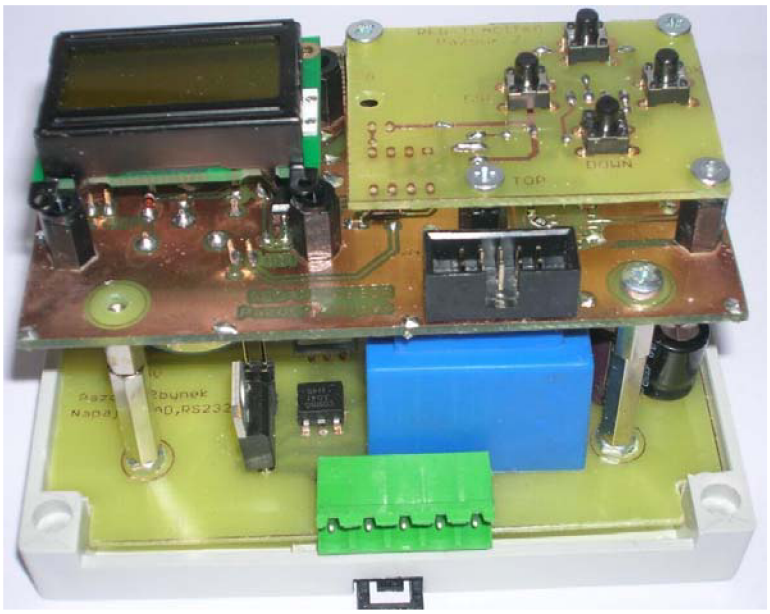
Obrázek 8.13 Osazovací výkres, strana BOTTOM (měřítko 1:1)

Tabulka 8.3 Seznam součástek desky tlačítek

Označení	Hodnota	Popis	Pouzdro	Počet
Rezistory				
R3,4,5,6	1k	Rezistor	0805	4
Ostatní				
UP,DOWN,MENU,ESC	P-B1720	Mikrotlačítko		4

8.4 Sestava regulátoru

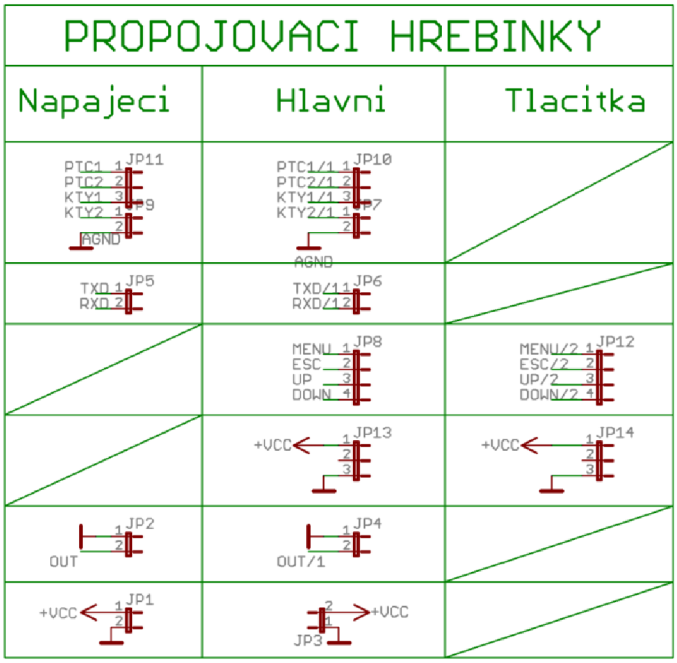
Jak již bylo řečeno, celý regulátor se skládá ze tří částí. Uspořádání jednotlivých DPS lze vidět na obrázku 8.14.



Obrázek 8.14 Uspořádání jednotlivých DPS regulátoru

Základní část je deska zdroje, která je uchycena ke krabičce. Uchycení se provádí pomocí kovových distančních sloupků o délce 30 mm , jenž zároveň vymezují vzdálenost mezi DPS zdroje a mikroprocesoru. K desce zdroje se pomocí konektorových lámacích kolíků, nebo plochého vícežilového kabelu připojí „hlavní“ deska mikroprocesorové části. Deska s ovládacími tlačítky je namontována na DPS mikroprocesoru ve vzdálenosti 10 mm od ní. Do stejné výšky lze pomocí distančních sloupků umístit i LCD displej.

Elektrické propojení jednotlivých částí, lze vytvořit několika různými způsoby. Pájecí plošky jsou rozmístěny přesně nad sebou (ve schématu jsou označeny jako JP). Jejich logické propojení a význam jednotlivých signálů je naznačen na následujícím obrázku 8.15.



Obrázek 8.15 Popis propojovacích konektorů (plošek)

Výsledný smontovaný regulátor je ukázán na obrázku 8.16. V příloze 3 je zobrazen výkres mechanického opracování regulátoru s rozměry a roztečí pro vytvoření otvoru na tlačítka, LCD displej a programovací konektor. V příloze 4 je poté zobrazen popis krabičky v měřítku 1:1. Komplexně uspořádaný seznam všech součástek je přiložen v příloze 5.

Obrázek 8.16 Výsledný regulátor

Tabulka 8.4 Seznam spojovacích a montážních součástek

Označení	Hodnota	Popis	Pouzdro	Počet
Spojovací a konstrukční materiál				
JP1,2,5,8,11,13	BL820G	Dutinková lišta		1
JP3,4,6,10	ASS12030G	Konektorové kolíky lámací 30mm		1
JP12,14	S1G20	Konektorové kolíky lámací 10 mm		1
DA5MX30		Distanční sloupek kovový 30mm		4
KDA6MX10		Plastový distanční sloupek 10mm		8
SKM3X6		Šroub M3 s půlkulatou hlavou délky 6mm		8
U-KPDIN3		Plastová krabička 6ti modulová na DIN		1

9 KALIBRACE TEPLOTNÍCH ČIDEL

Po připojení měřicí části k mikroprocesoru je nutné kalibrovat teplotní čidla s mikroprocesorem a zjistit vzorec pro přepočet digitální nasnímané hodnoty na teplotu. Kalibrace teplotních čidel PT 100 je vzhledem ke svému lineárnímu průběhu jednodušší než kalibrace čidel KTY 81-210.

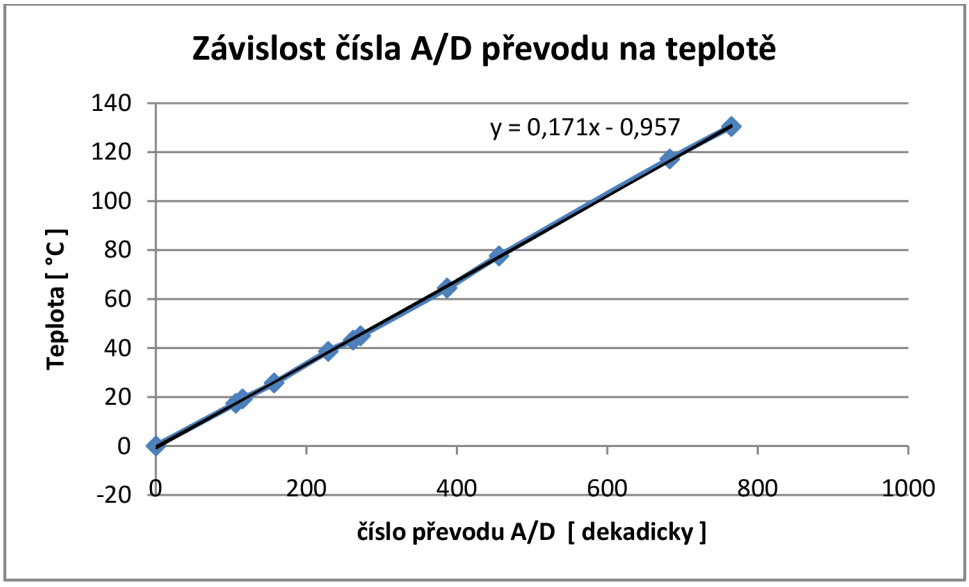
Pro kalibraci byly použity přesné rezistory s tolerancí 1%. Jejich hodnota odporu odpovídá minimální a maximální hodnotě teploty. Pro přesný přepočet teploty je však dobré změřit více hodnot. Pro všechny změřené hodnoty odporu byly zaznamenány dekadické hodnoty A/D převodníku. V mikroprocesoru je pro snímání měřených veličin použit 10bitový A/D převodník. Dekadická hodnota teploty bude tedy v rozsahu 0 až 1023. Pro kalibraci teplotních čidel byl vytvořen speciální program zobrazující dekadickou hodnotu A/D převodníku.

V první řadě připojíme k měřicí části mikroprocesoru hodnotu odporu odpovídající nulové teplotě čidla. Pomocí víceotáčkového trimru nastavíme velikost virtuální nuly. Na displeji by se nám měla objevit nulová hodnota A/D převodníku. V dalším kroku postupně připojujeme několik různých hodnot rezistorů odpovídající určité teplotě v daném rozsahu čidla a zapisujeme si dekadickou hodnotu navzorkovanou A/D převodníkem.

Po vynesení závislosti vzorkované hodnoty na teplotě do grafu pomocí rovnice regrese je zjištěn popis této závislosti. Zjištěnou závislost dále používáme v algoritmu programu pro výpočet a zobrazení teploty ve °C.

9.1 Kalibrace PT100

Popis závislosti pro tento druh čidla je celkem snadný. Jak je vidět z obrázku 9.1, má závislost téměř lineární průběh.



Obrázek 9.1 Závislost čísla A/D převodu na teplotě pro PT100

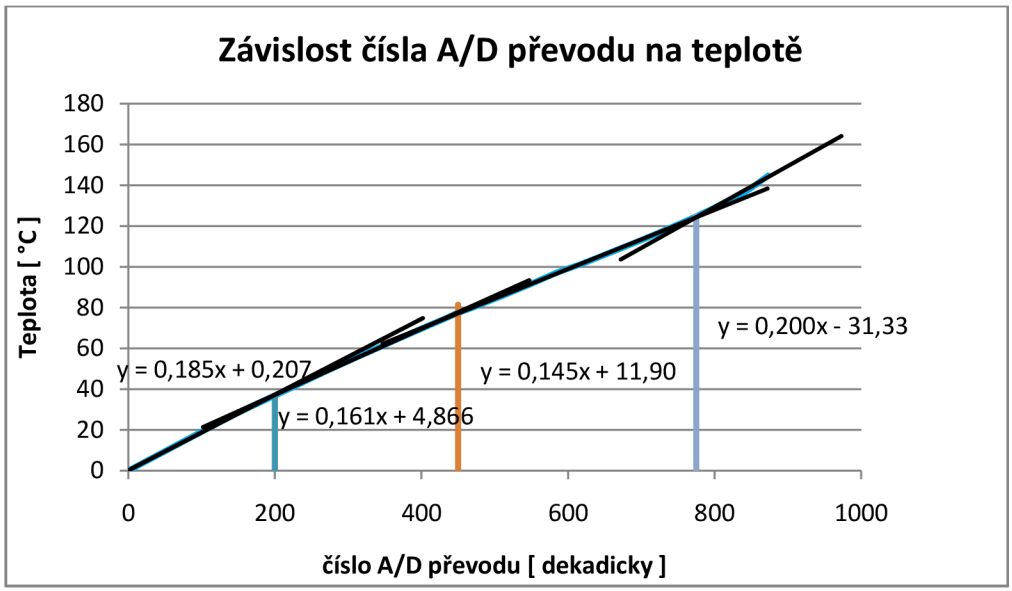
Rovnice popisující zobrazenou závislost má následující tvar

$$y = 0{,}171x - 0{,}957 \ , \tag{9.1}$$

kde y je naměřená teplota a x odpovídá její dekadické hodnotě v A/D převodníku.

9.2 Kalibrace KTY 81-210

Kalibrace u tohoto typu čidel probíhá stejným způsobem jako u předešlého typu. Naměřená závislost je vynesená na obrázku 9.2.



Obrázek 9.2 Závislost čísla A/D převodu na teplotě pro KTY81-210

Jak již bylo řečeno, není závislost odporu čidla na teplotě lineární. Výsledný průběh je proto nutné linearizovat. Teplotní čidlo KTY81-210 má tedy čtyři rovnice popisující lineární závislost na dekadické hodnotě A/D převodníku.

Pro vzorkované hodnoty 0 až 200 (0°C - 37°C) odpovídá závislost rovnici

$$y = 0{,}185x + 0{,}207 \ . \tag{9.2}$$

Pro vzorkované hodnoty 200 až 450 (37°C - 81°C) odpovídá závislost rovnici

$$y = 0{,}161x + 4{,}866 \ . \tag{9.3}$$

Pro vzorkované hodnoty 450 až 775 (81°C - 125°C) odpovídá závislost rovnici

$$y = 0{,}145x + 11{,}90 \ . \tag{9.4}$$

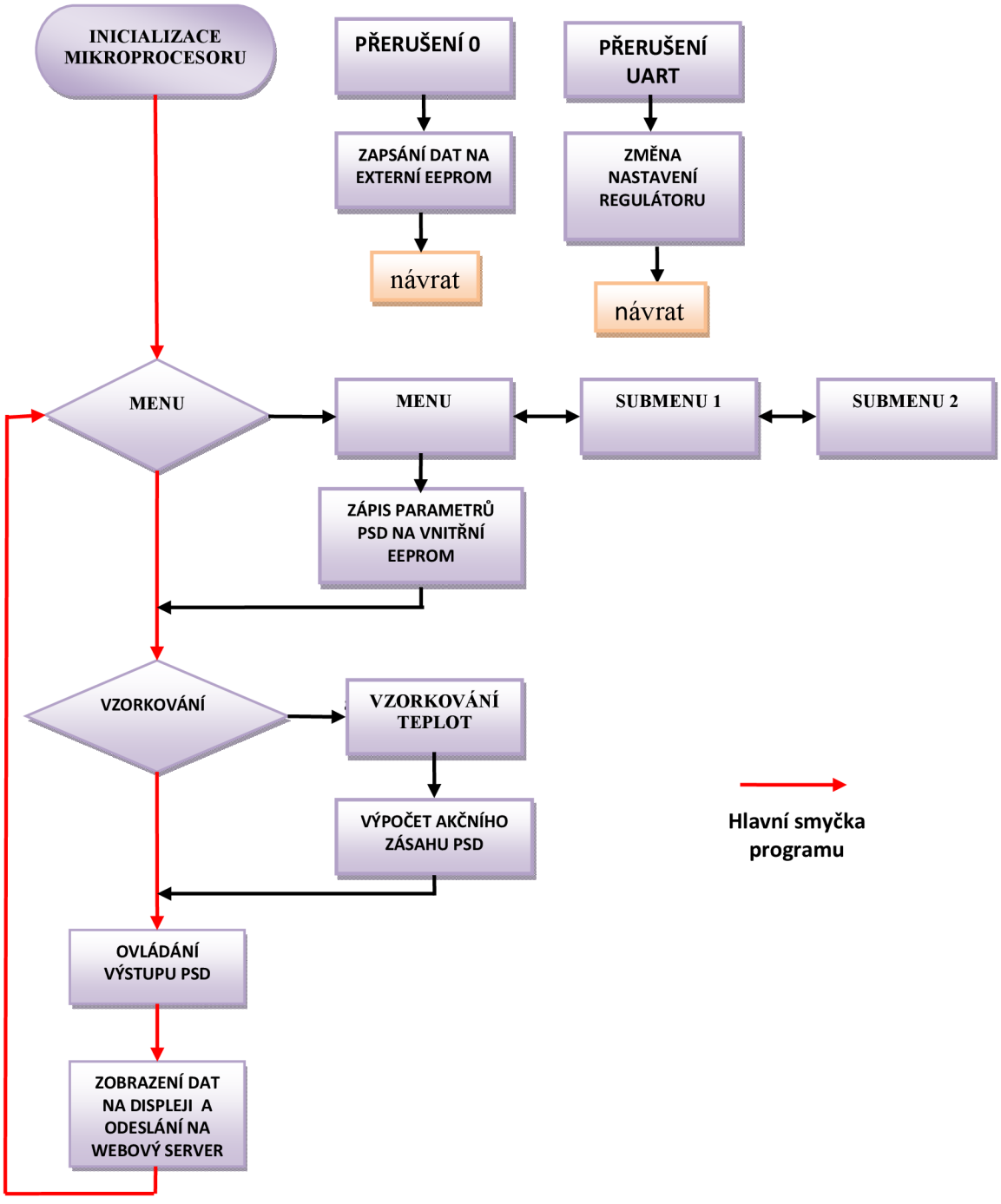
Pro vzorkované hodnoty 775 až 1023 (125°C - 150°C) odpovídá závislost rovnici

$$y = 0{,}200x + 31{,}33 \ . \tag{9.5}$$

V algoritmu programu pro výpočet a zobrazení teploty ve stupních Celsia je tedy zabudován výběr předešlých rovnic výpočtu v závislosti na dekadické velikosti vzorku.

10 OVLÁDACÍ PROGRAM REGULÁTORU

Ovládací program pro mikroprocesor byl vytvořen v prostředí AVR Studio 4.16 využívající vyšší programovací jazyk C (GCC). Program je rozdělen do třech základních bloků. První z nich je hlavní neustále se opakující smyčka. Další dva bloky slouží k obsluze přerušení od obvodu RTC a obsluze přerušení při příjmu sériové komunikace. Vývojový diagram ovládacího programu je uveden na obrázku 10.1.



Obrázek 10.1 Vývojový diagram programu mikroprocesoru

Jak je patrné z vývojového diagramu programu mikroprocesoru, je program řešen jednoúkolově. To znamená, že v programu běží neustále hlavní smyčka, která v závislosti na určitých podmětech spouští další úlohy. Kdykoliv v běhu programu však může dojít k přerušení. Jedno přerušení je spouštěno obvodem reálného času, kdy dojde k uložení dat na externí paměť EEPROM. Druhé přerušení je spouštěno přijmutím řetězce znaků sériové komunikace od webového serveru, které inicializuje změnu nastavení parametrů regulátoru.

Pro přehlednost vytvořeného programu je program tvořen pěti knihovnami. První knihovna (psd.c) zastupuje funkci hlavní smyčky vyvíjeného algoritmu. Druhá knihovna (i2c.c) slouží pro komunikaci mikroprocesoru pomocí I2C rozhraní pro nastavení obvodu reálného času, data a periody ukládání teplot do paměti. Třetí knihovna (menu.c) má na starost nastavovací a ovládací nabídku regulátoru. Knihovna s názvem lcd.c se stará o komunikaci mikroprocesoru s displejem LCD a poslední knihovna (uart.c) obsluhuje vysílání a přijímání řetězce znaků pomocí sériové linky. Popis použitých funkcí v jednotlivých knihovnách je uveden v následujícím textu.

10.1 Funkce knihovny psd.c

Hlavní knihovna se stará o inicializaci mikroprocesoru, obsluhu přerušení ukládání dat do paměti a přesný výpočet algoritmu PSD regulátoru. Knihovna obsahuje tyto funkce:

- init_CPU () - Funkce slouží pro inicializaci mikroprocesoru. Jsou zde definovány vstupní a výstupní porty, nastavení A/D převodníku a nastavení jednotlivých přerušení.
- zapis_firstEEPROM () - Funkce obsahuje zdrojový kód pro první uložení dat na externí paměť. Postup ukládání je znázorněn na obrázku 7.19.
- zapis_nextEEPROM () - Funkce slouží pro další ukládání dat na externí paměť. Zde už není ukládán datum a čas, ale pouze naměřené teploty.
- vzorkovani() - Funkce se stará o vzorkování teplot. Podle výběru teplotních čidel snímá teplotu na daných vstupech.
- vypocetPT() - Funkce slouží pro přepočet dekadické hodnoty AD převodníku na teplotu ve stupních Celsia pro čidla PT100.
- vypocetKT() - Funkce slouží pro přepočet dekadické hodnoty AD převodníku na teplotu ve stupních Celsia pro čidla KTY81/210.
- displej() - Funkce se stará o zobrazení vybraných dat na displeji LCD během programu. Uživatel má možnost nastavit zobrazení času a data, teploty, nebo úsporného režimu, který displej vypne.
- vypocet_konst PSD () - Ze zadaných hodnot T_i, T_d, r_o a T vypočte konstanty q0, q1 a q2 dle rovnice 4.14.
- init_LED () - Zapnutí nebo vypnutí podsvícení LCD displeje.

- ISR (INT0_vect) - Obsluha přerušení od obvodu RTC.
- ISR (INT1_vect) - Obsluha přerušení od generátoru vzorkovací periody.

Výsledný kód obsahuje 556 řádků textu.

10.2 Funkce knihovny i2c.c

Knihovna se stará o inicializaci komunikace I2C a obsluhu obvodu reálného času, který pomocí této sběrnice s mikroprocesorem komunikuje.

- i2c_init () - Inicializace komunikace I2C.
- twi_start () - Počáteční podmínka komunikace.
- twi_stop () - Koncová podmínka komunikace.
- init_RTC () - Inicializace obvodu reálného času
- nacti_RTC () - Načtení dat z obvodu RTC do mikroprocesoru
- zobraz_cas () - Zobrazení času na první řádek displeje ve tvaru hh:mm:ss a data na druhý řádek displeje ve tvaru dd.mm.rr
- nastav_cas () - Nastavení času a data pomocí tlačítek
- zapis_RTC () - Zapsání nastavených hodnot do obvodu RTC
- smaz_cas () - Smazání času a data v obvodu RTC
- nastav_citac () - Nastavení periody ukládání dat na externí paměť

Výsledný kód obsahuje 678 řádků textu.

10.3 Funkce knihovny menu.c

Knihovna obsahuje algoritmus pro nastavení víceúrovňového menu a jeho ovládání.

- zapis_par_pid () - Po opuštění menu regulátoru tato funkce uloží nastavené parametry regulátoru na interní paměť
- nacti_par_pid () - Po připojení napájecího napětí k mikroprocesoru se načtou uložená data z interní paměti a dále se s nimi pracuje.

Další funkce mají stejné názvy jako položky menu, které obsluhují. Přehled jednotlivých funkcí je naznačen v příloze 6.

Výsledný kód obsahuje 1060 řádků textu.

10.4 Funkce knihovny lcd.c

Knihovna pro komunikaci s LCD displejem byla převzata od autora Petera Flauryho, přepracovaná ing. Tomášem Frýzou. Knihovna obsahuje následující funkce:

- lcd_init () - Inicializace LCD displeje.
- lcd_clrscr () - Smazaní obsahu displeje.
- lcd_command () - Zápis 1bytové instrukce.
- lcd_data () - Zápis 1bytového datového slova.
- lcd_write () - Zápis instrukce, nebo dat.
- lcd_gotoxy () - Přesun kurzoru na pozici x,y.
- lcd_putc () - Zobrazení jednoho znaku.
- lcd_puts () - Zobrazení řetězce znaků.

10.5 Funkce knihovny uart.c

Knihovna sloužící pro obsluhu sériové linky byla převzata od autora Petera Flauryho. Knihovna obsahuje následující funkce:

- uart1_init () - Inicializace sériové linky.
- uart1_getc () - Příjem dat ze sériové linky.
- uart1_putc () - Odeslání jednoho znaku.
- uart1_puts () - Odeslání řetězce znaků.

10.6 Vlastní algoritmus regulátoru

Základní princip regulátoru vychází z přírůstkového tvaru algoritmu PSD regulátoru ve tvaru diferenční rovnice uvedeným v rovnici 4.12. Pro náhradu integrálu je použita zpětná obdélníková metoda [4]. Algoritmus generátoru tedy vypočítá velikost akčního zásahu $\Delta u(Kt)$ na základě změřené aktuální regulační odchylky a její pamatované minulé a předminulé hodnoty.

Z nastavitelných parametrů regulátoru se v prvním kroku vypočítají pomocné parametry q0, q1 a q2 pomocí rovnice (4.14).

```
q0=r0*(1+(Td/T)+(T/Ti));          // Výpočet q0
q1=r0*(1+(2*(Td/T)));             // Výpočet q1
q2=r0*(Td/T);                     // Výpočet q2
```

V dalším kroku už dochází k výpočtu odchylky velikosti akčního zásahu a jeho případná změna. Je zde také kontrolována podmínka (6.2), aby nedošlo k přehřátí zásobníku teplé vody. Algoritmus výpočtu popisuje následující zdrojový kód.

```
if (teplota_B<Tmax) OUT_ON;       // Zapnu výstup, pokud není dosaženo maximální teploty
e_0=e_1;                          // Minulou vypočítanou odchylku uložím do předminulé
e_1=e_2;                          // Aktuální odchylku z minulého kroku uložím do minulé
e_2=((teplota_A-Dif)-teplota_B);  // Vypočtu aktuální odchylku
ukt=((q0*e_2)+(q1*e_1)+(q2*e_0)); // Vypočtu odchylku změny velikosti zásahu
zasah=zasah+ukt;                  // K velikosti zásahu přičtu jeho vypočítanou změnu
```

Celý zdrojový kód obsahuje přes 2500 řádků textu a zabírá 1590 bytů programové paměti mikroprocesoru ATmega16.

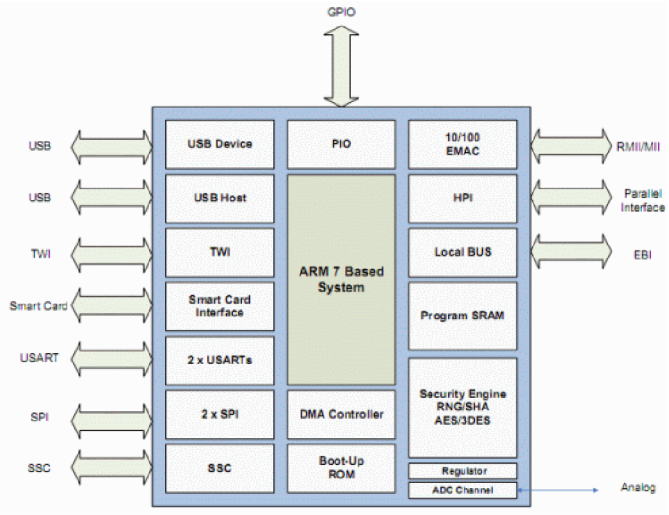
11 KOMUNIKAČNÍ WIFI MODUL

Jak již bylo řečeno, pro komunikaci regulátoru s PC pomocí bezdrátové technologie byl vytvořen komunikační modul WiFi. Komunikace mezi regulátorem a komunikačním modulem probíhá pomocí asynchronní sériové linky RS-232. Z modulu jsou data přenášena k uživatelskému PC a zpět pomocí bezdrátové technologie WiFi.

Hlavní součástí komunikačního modulu je samotný WiFi modul, který lze koupit jako hotovou součástku od firmy Connect One.

Obrázek 11.1 WiFi modul firmy Connect One (převzato z [13])

Velikou výhodou modulu je, že obsahuje již zabudovanou anténu, kompletní komunikační protokoly technologie WiFi a komunikace mikroprocesoru s moduly WiFi může probíhat pomocí většiny běžných komunikačních linek (SPI, UART, Smart Card, USB atd.). Hlavním jádrem modulu je obvod CO2144, který je integrován do pouzdra LFBGA-144 a obsahuje 32 bitové jádro ARM7TDMI spolu s rychlou pamětí o velikosti 256kB.



Obrázek 11.2 Blokové schéma obvodu CO2144 (převzato z [13])

Podporované protokoly:

- TELNET, DNS, UDP, IP, HTTP, FFTP, SMTP a další.
- Bezpečnostní protokoly: SSL3, HTTPS, FTPS a další.
- Počet současně otevřených socketů: 10

Moduly mají v sobě implementovány dva zabudované webové servery. První z nich slouží pro samotnou konfiguraci a správu modulu. Druhý webserver je uživatelský a je tedy možné a velice snadné vytvořit plnohodnotné webové stránky obsahující libovolnou grafiku, Java Applety a jiné klasické prvky webových stránek s dynamickými proměnnými.

Více informací o WiFi modulu lze získat na stránkách www.connectone.com, www.spezial.cz a www.pandatron.cz

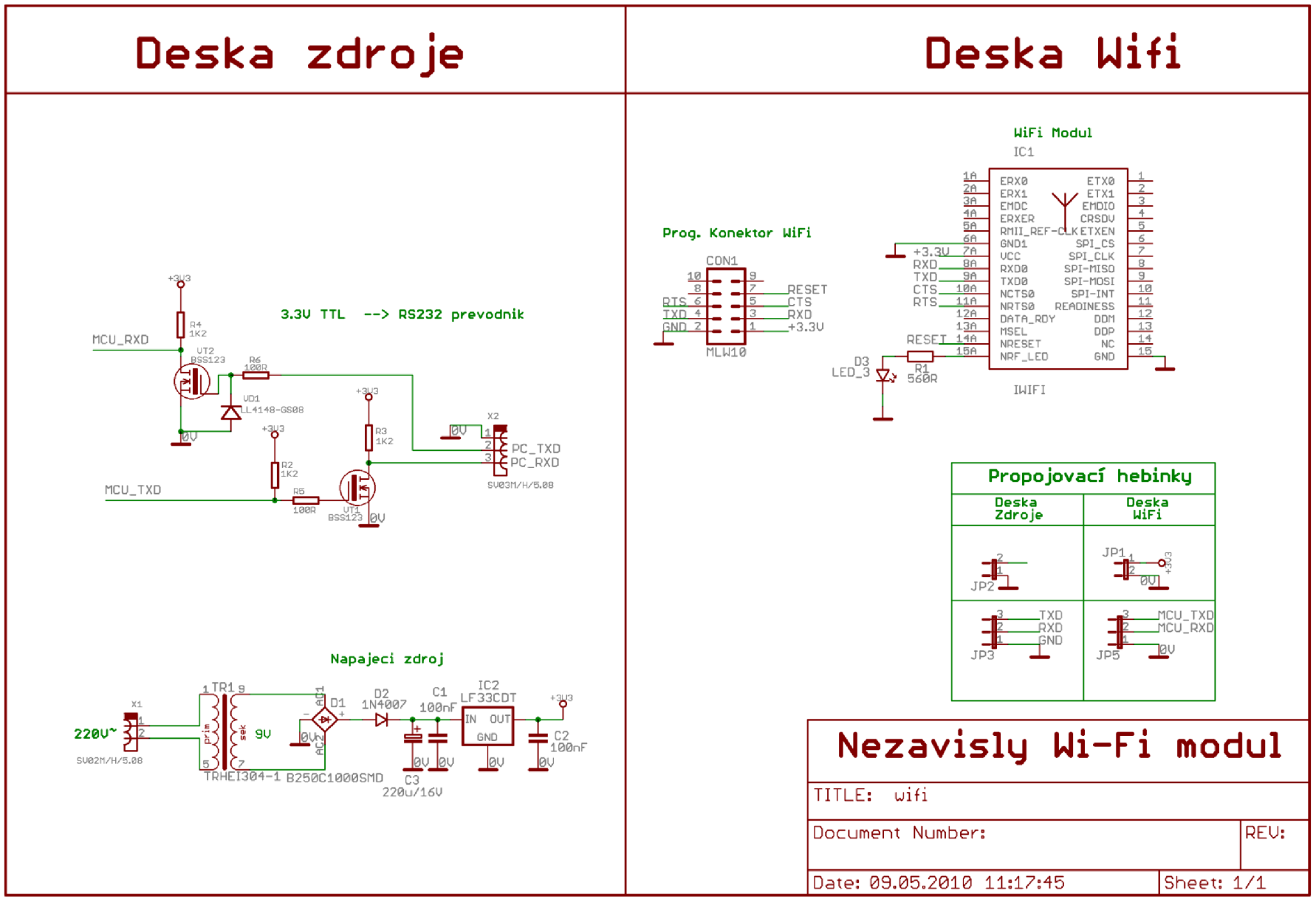
11.1 Zapojení komunikačního modulu

Na obrázku 11.3 lze vidět zapojení celého komunikačního modulu. Schéma obsahuje kromě vlastního WiFi modulu napájecí zdroj a převodník úrovní TTL<->RS-232.

Napájecí zdroj transformuje střídavé napájecí napětí o velikosti 220V na střídavé napětí o velikosti 9V, které je dále usměrněno a stabilizováno. Jako stabilizátor byl použit přesný lineární stabilizátor LF33CDT. Vzhledem k tomu, že WiFi modul funguje pouze pro napájení v rozmezí 3,2 - 3,4 V, je stabilizace velmi důležitá. Dalším důležitým prvkem je filtrační kondenzátor C3, jehož nejmenší hodnota může být 220 μF, protože WiFi modul má spotřebu kolem 150mA a při malé kapacitě filtračního kondenzátoru může docházet k poklesu napájení a výpadku komunikace.

Pro nutnost převodu úrovní RS-232 na tří voltovou TTL logiku musel být do komunikačního modulu zabudován převodník úrovní. Ten je tvořen pouze dvěma tranzistory a několika rezistory. Jelikož se nejedná o plnohodnotný převodník úrovní, je jeho správná funkce zajištěna pouze při použití plnohodnotné převodníku na druhé straně komunikace. Ta je v případě regulátoru zajištěna obvodem MAX-232CWE.

Prvotní nastavení WiFi je nutné pomocí sériové linky. To nám zajistí po požádání prodejce modulu. Pokud bychom chtěli prvotní nastavení provádět sami, byl do komunikačního modulu přidán konektor pro možnost připojení k PC. Tento konektor také slouží pro aktualizaci firmware, kterou lze provádět pomocí sériové linky. Popis prvotního nastavení a aktualizace firmware lze nalézt v [14].

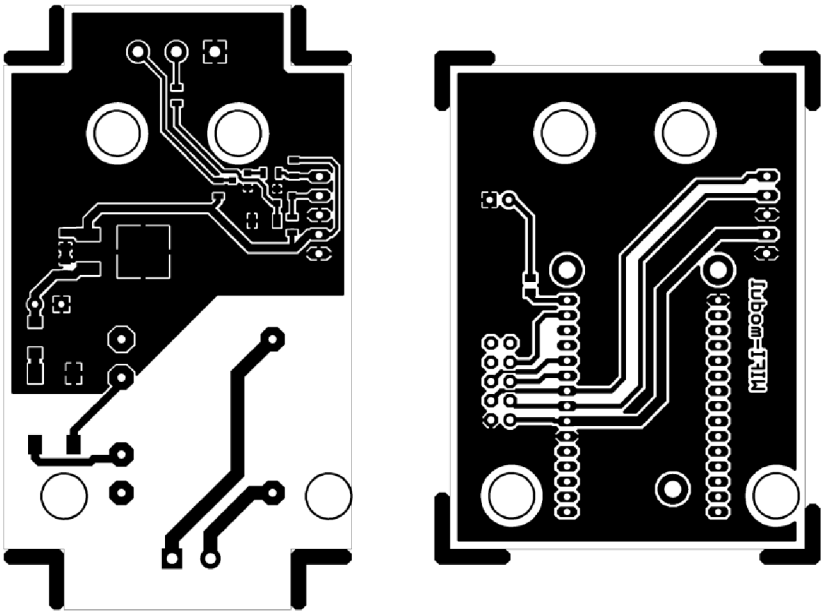


Obrázek 11.3 Schéma zapojení modulu WiFi

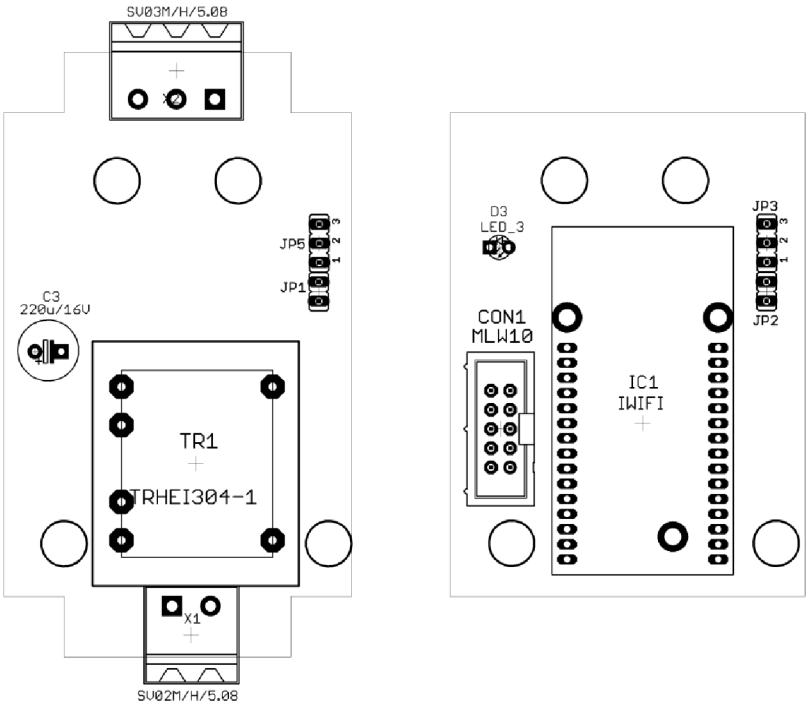
11.2 Konstrukce modulu

Komunikační modul byl opět realizován, aby jej bylo možné zabudovat na DIN lištu do rozvaděče MaR. Konstrukční krabička byla vybrána o velikosti tří modulů (označení v GM Electronic je U-KPDIN2). Rozměru konstrukční krabičky odpovídá návrh DPS komunikačního modulu. Celková sestava modulu je tvořena dvěma DPS , které jsou opět propojeny pomocí konektorových kolíků dané velikosti. Způsob propojení je ukázán na obrázku 11.3. Spodní deska obsahuje napájecí zdroj, převodník TTL<->RS-232 a vstupní konektory. Na druhé desce je umístěn samotný WiFi modul a programovací konektor.

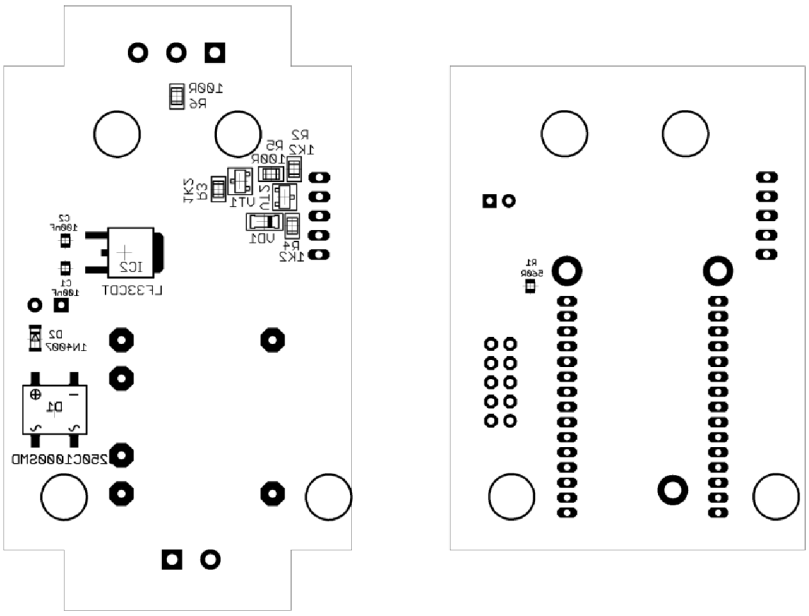
DPS jsou navrženy jako jednovrstvé s kombinovanou montáží. Pro návrh byla použita čtvrtá třída přesnosti Na straně BOTTOM jsou umístěny SMD součástky a na straně TOP klasické vývodové součástky. Klišé plošných spojů a osazovací výkresy jsou zobrazeny na následujících obrázkách.



Obrázek 11.4 Klišé plošných spojů strana BOTTOM (měřítko 1:1)



Obrázek 11.5 Osazovací výkres, strana TOP (měřítko 1:1)



Obrázek 11.6 Osazovací výkres, strana BOTTOM (měřítko 1:1)

Tabulka 11.1 Seznam použitých součástek

Označení	Hodnota	Popis	Pouzdro	Počet
Rezistory				
R5,6	100R	Rezistor	0805	2
R1	560R	Rezistor	0805	1
R2,3,4	1k2	Rezistor	0805	3
Kondenzátory				
C1,2	100nF	Kondenzátor keramický	0805	2
C3	220uF/16V	Elektrolytický kondenzátor	RM2,5	1
Diody				
VD1	1N4148	Dioda	SOD80	1
D2	1N4007	Dioda	SOD80	1
D3	LED -3mm	Led dioda 3mm		1
D1	B250C 1000SMD	Usměrňovací můstek	MiniDIL	1
Integrované obvody				
IC1	WIFI	Modul WiFi		1
IC2	LF33CDT	Lineární stabilizátor	TO252AA	1
Ostatní				
VT1,2	BSS123	Tranzistor N-MOS	SOT-23	2
TR1	TRHEI304-1X9	Transformátor 1x9V		1
JP2,3	BL820G	Dutinková lišta		1
JP1,5	ASS12030G	Konektorové kolíky lámací 30mm		1
X1	SV02M/5,08	Násuvná svorkovnice 90°		1
X2	SV03M/5,08	Násuvná svorkovnice 90°		1
CON1	MLW10	Programovací konektor	MLW-10G	1
DA5MX30		Distanční sloupek kovový 30mm		4
SKM3X6		Šroub M3 s půlkulatou hlavou délky 6mm		4
U-KPDIN2		Plastová krabička 3 modulová na DIN		1

Obrázek 11.7 Hotový komunikační modul

12 WEBOVÝ SERVER

Pro možnost komunikace s regulátorem pomocí technologie Wifi byl vytvořen webový server pro obsluhu regulátoru. Server je složen ze dvou stránek. První stránka (obrázek 12.1), která je koncipována jako domovská, slouží pro zobrazení nastavení sítě a aktuální teploty. Uživatel má možnost zjistit sílu signálu, kvalitu linky a aktuální teplotu na kolektoru a v zásobníku teplé vody. Celá stránka je vytvořena tak, aby se automaticky obnovovala každých 20 sekund.

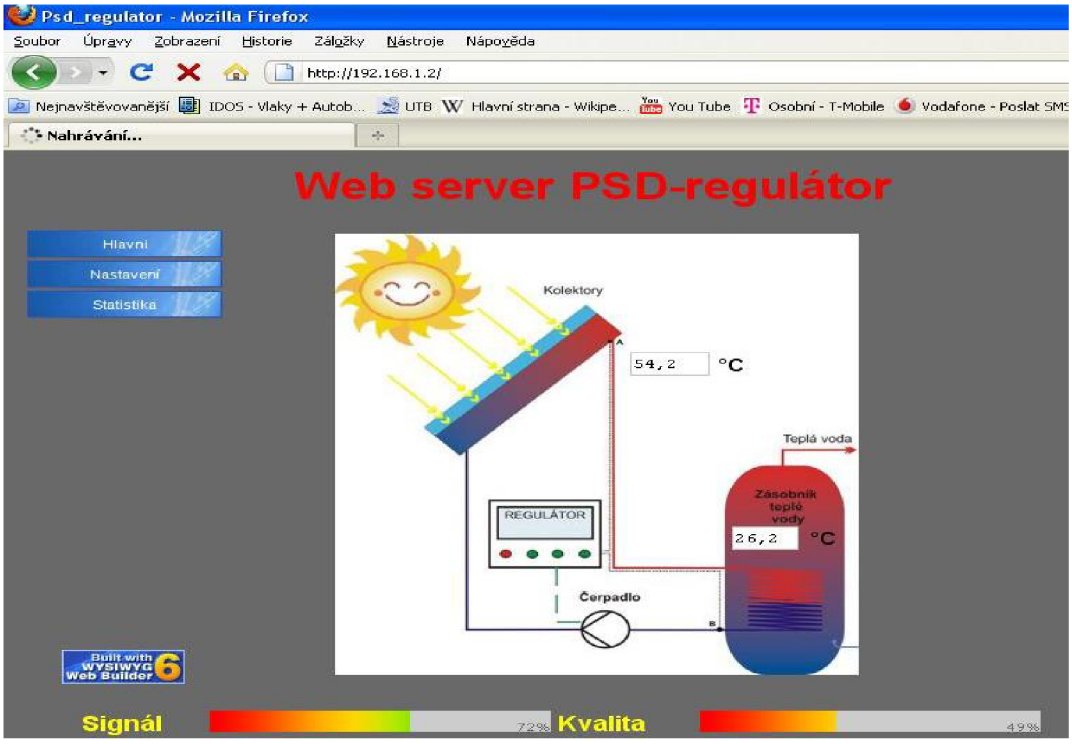
Webový server byl vytvořen v programu pro objektové vytváření webových stránek Web Builder 6.0. Stránky jsou vytvořeny pomocí Java scriptů, které umožňují používat proměnné. Komunikace mezi webovým serverem a mikroprocesorem probíhá pomocí AT příkazů. Vyšle-li mikroprocesor řetězec znaků s aktuální teplotou na kolektoru :

AT+iteplota1 =54,2

a na webovém serveru je umístěná proměnná se stejným názvem teplota1, např.

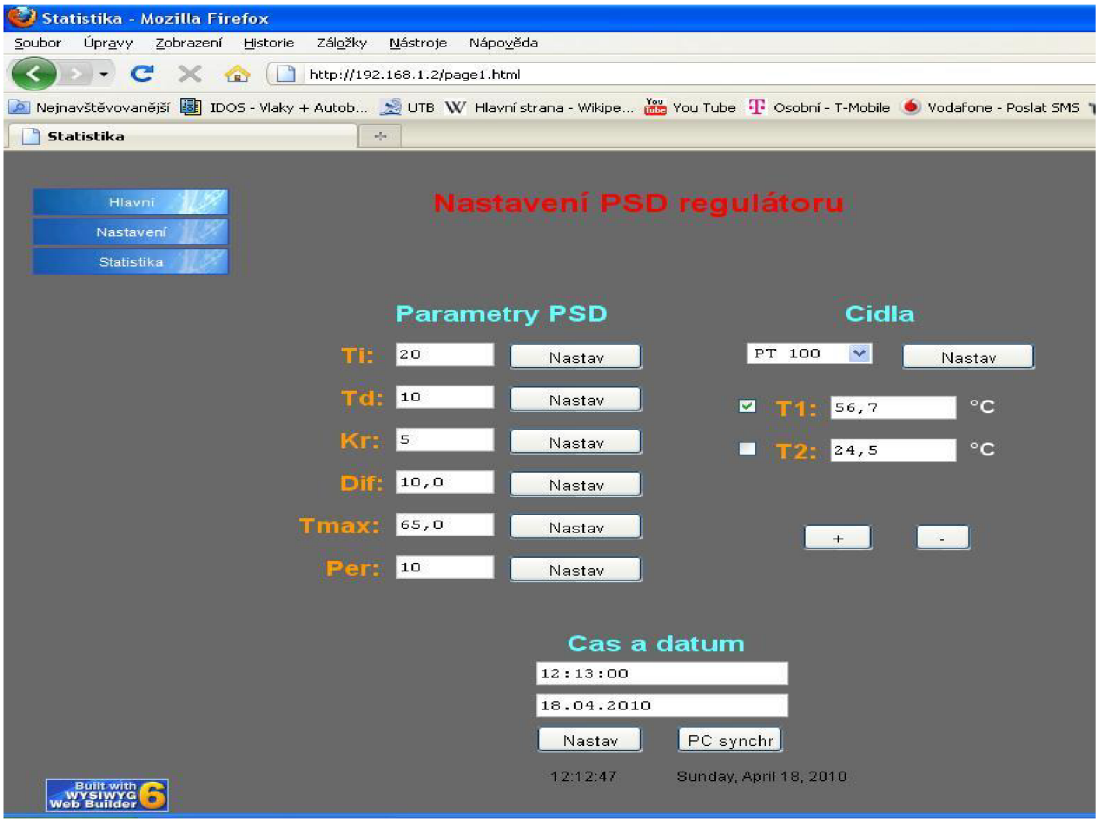
<input type="text" name="Editbox1" value="~teplota1~">,

přepíše se tato proměnná aktuální teplotou a při obnovení stránky se nám zobrazí v prohlížeči.



Obrázek 12.1 První stránka webserveru

Druhá stránka webového serveru (obrázek 12.2) slouží pro možnost nastavení parametrů regulátoru.



Obrázek 12.2 Druhá stránka webserveru

Jak je patrné z obrázku, uživatel má možnost pomocí serveru změnit všechny parametry (PSD regulace, datum, čas apod.) a pomocí serveru lze i vybrat typ čidel a softwarově je kalibrovat.

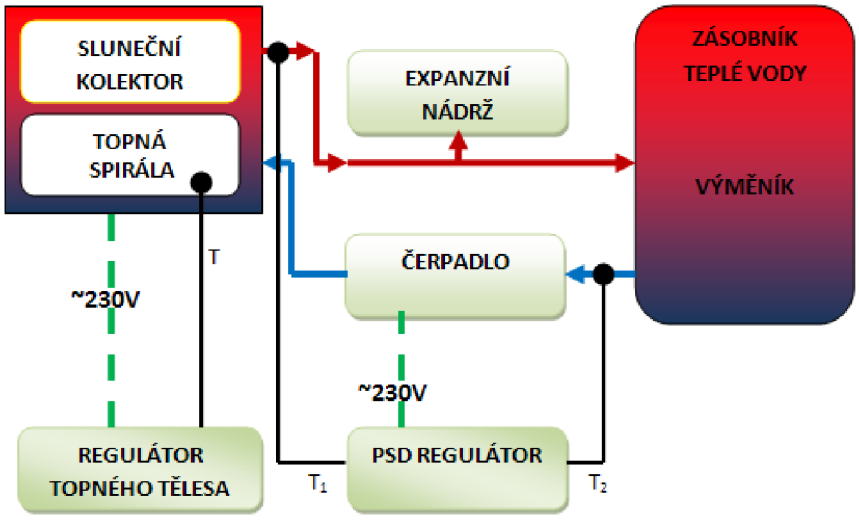
Nastavení parametrů probíhá stejným způsobem jako zobrazení teploty. Na webovém serveru si nastavíme velikost proměnné, kterou chceme změnit a odešleme stisknutím tlačítka ***Nastav***. Webový server nám do regulátoru pošle řetězec znaků s názvem proměnné a její změněnou hodnotou (*AT+iTi=20*). V mikroprocesoru je možné extrahovat název a velikost proměnné, kterou lze následovně změnit.

Webový server bude v budoucnu doplněn i třetí stránkou, která bude sloužit pro statistické a grafické zobrazení teplot. Uživatel bude mít možnost si zobrazit průměrné, minimální a maximální teploty za určitá časová období, graficky zobrazit pohyb denních teplot na solárním panelu a v zásobníku teplé vody.

V případě zabudování regulátoru do reálného solárního systému pro ohřev teplé vody a získání pevné IP adresy je naplánováno zpřístupnit tuto statistickou stránku na internetu.

13 MODELOVÁ SOUSTAVA SOLÁRNÍHO SYSTÉMU

Každý regulátor se musí správně nastavit, aby byla kvalita regulace co nejlepší. Nastavení regulátoru probíhá přímo na soustavě, kde bude regulátor použit. Z tohoto důvodu byla vytvořena modelové soustava solárního systému. Blokové schéma vytvořené soustavy je vidět na obrázku 13.1. Soustava obsahuje stejné bloky, které jsou popsány v první kapitole. Z důvodu měření a zkoumání parametrů jak soustavy, tak regulátoru, byla navíc do slunečního kolektoru zabudována topná spirála. K ovládání topné spirály je použit druhý regulátor. Expanzní nádrž slouží pouze pro vyrovnání a dosažení správného tlaku primárního okruhu.

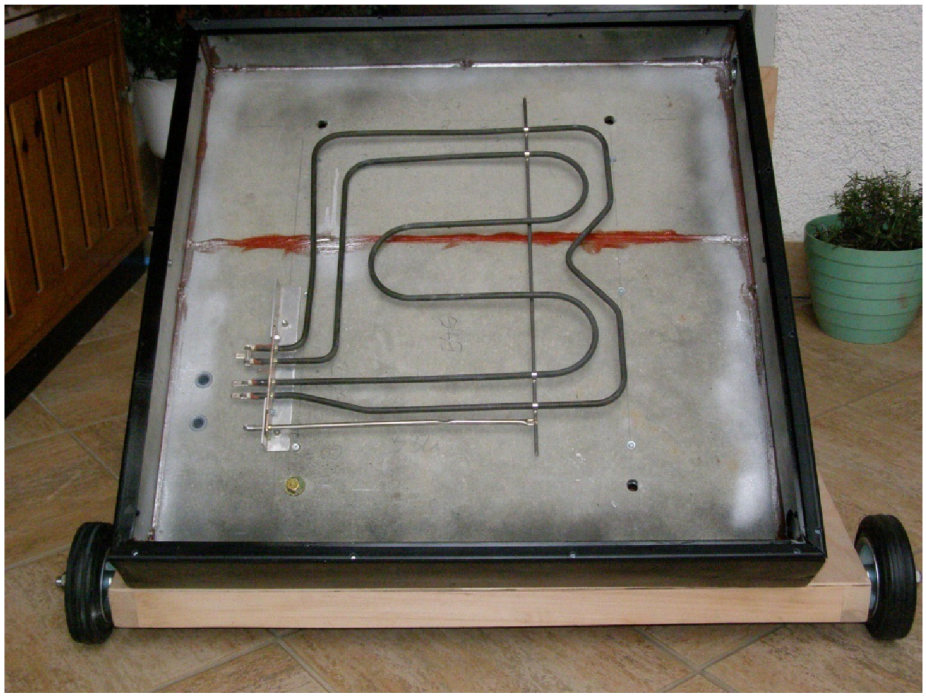


Obrázek 13.1 Blokové schéma modelu soustavy solárního systému

Fotogalerie vytvořené regulované soustavy, která byla používána pro nastavení regulátoru a zjištění dynamických parametru je přiložena v příloze 7.

13.1 Sluneční kolektor

Pro přeměnu slunečního záření na teplo byl použit panel o rozměru 60 x 60 cm. Panel byl zabudován do železného rámu a tepelně izolován od okolního prostředí. Jako izolace je použit tvrzený tepelně odolný polystyren STYRODUR o síle 1cm a tepelně nevodivé lignátové desky. Z důvodu možnosti simulace slunečního záření bylo do rámu slunečního kolektoru zabudováno topné těleso. Výkon topného tělesa je 750W. Ukázka vytvořeného rámu se zabudovaným tělesem je na obrázku 13.2.



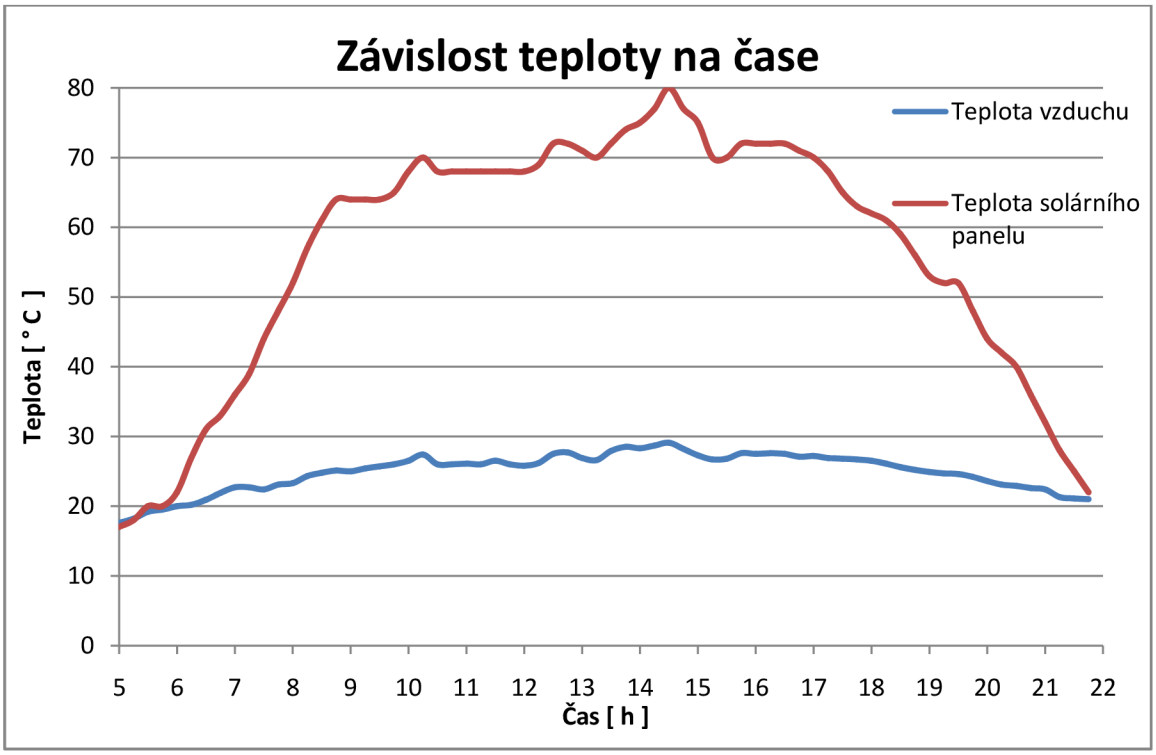
Obrázek 13.2 Rám solárního panelu se zabudovaným topným tělesem

13.2 Regulátor topného tělesa

Pro ovládání topného tělesa slouží regulátor. Vzhledem k časovému zpoždění a možnostem přijímání tepla solárním panelem od topné spirály byl vybrán a použit jednoduchý regulátor typu ON/OFF s volitelnou hysterezí. Regulátor obsahuje dva programy nastavení teploty topného tělesa.

První program dovolí uživateli, který chce simulovat sluneční energii nastavit teplotu v rozsahu od 0 do 99 °C a tu neustále udržuje.

Druhý program slouží pro celodenní simulaci slunečního záření v závislosti na čase. Denní závislost teploty panelu byla sestavena na základě denních teplot dne 3.7.2009, které byly poskytnuty RNDr. Vladimírem Burdou z observatoře Praha – Libuš. Závislost denních teplot a teplot na solárním panelu je ukázána na obrázku 13.3.



Obrázek 13.3 Závislost denních teplot a teplot solárního panelu dne 3.7.2009

13.3 Zásobník teplé vody

Pro model solárního systému byl použit plastový zásobník vody s objemem 20 litrů. Pro předání energie z primárního okruhu do sekundárního slouží topná měděná spirála zobrazená na následujícím obrázku. Délka topné spirály je v rozvinutém stavu 6m o průměru 20 mm.

Obrázek 13.4 Topná spirála

14 NASTAVENÍ REGULÁTORU

Pro nastavení regulátoru lze použít mnoho různých metod. Názvy některých metod jsou popsány v kapitole 5. Každá metoda využívá pro optimalizaci a nastavení regulátoru různé způsoby zjištění a matematického popisu soustavy, pomocí kterého lze dopočítat správnou velikost stavitelných regulátorů.

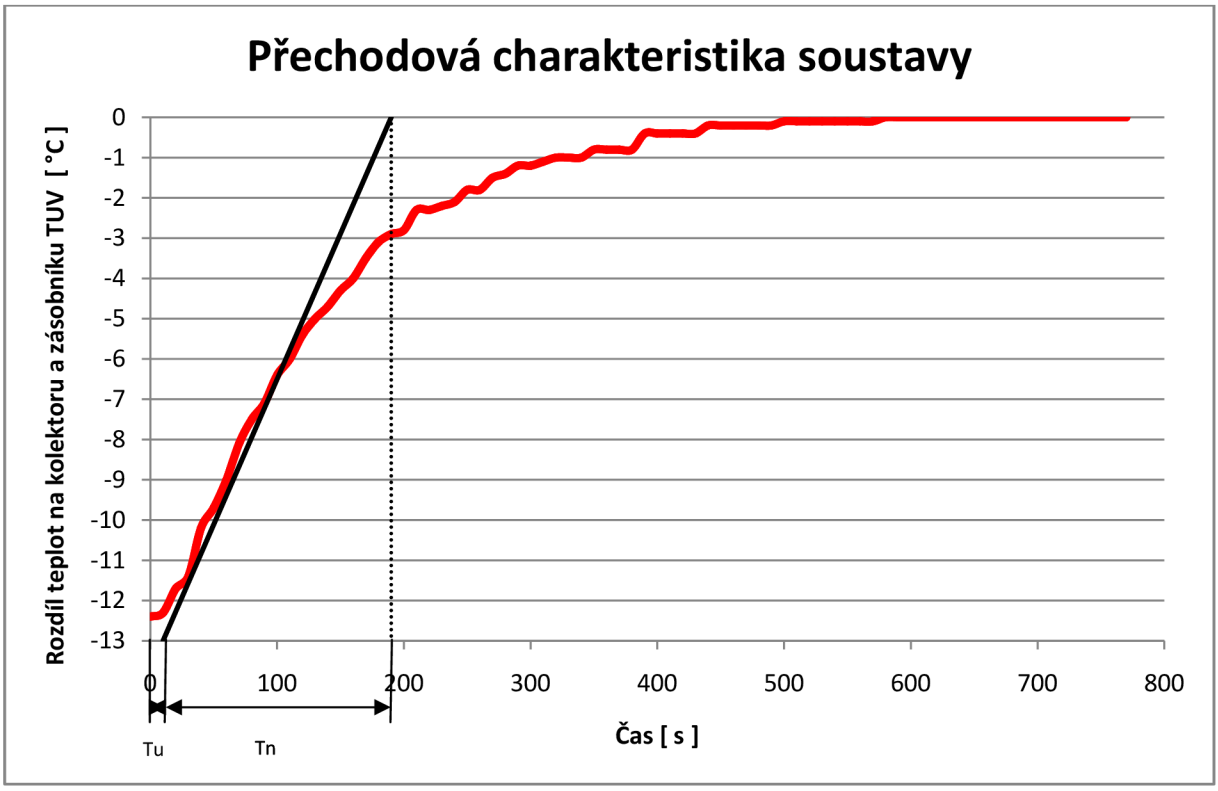
Vzhledem k tomu, že dynamické parametry soustav solárních systému pro ohřev teplé užitkové vody se mění pro každou soustavu v závislosti na velikosti solárního panelu, objemu zásobníku teplé vody, velikosti topné spirály předávající teplo primárního okruhu do sekundárního, tepelnou vodivostí kapaliny primárního okruhu a v neposlední řadě zeměpisným umístěním solárních panelů, nelze stanovit jedno nastavení regulátoru pro více systémů. Je tedy zřejmé, že se každý regulátor bude muset nastavovat v závislosti na solárním systému. Také jedna z podmínek návrhu regulátoru byla snadné nastavení regulátoru, které by zvládl každý běžný uživatel.

Po zvážení těchto podmínek byla nakonec vybrána metoda Ziegler-Nicholsova pro nastavení regulátoru ze zjištěné přechodové charakteristiky regulované soustavy. Popis použití této metody bude ukázáno pro nastavení regulátoru ve vytvořeném modelovém solárním systému.

14.1 Přechodová charakteristika

Pro zjištění přechodové charakteristiky systému, můžeme vycházet ze dvou možností. První možností je změřit přechodovou charakteristiku zásobníku teplé vody, kde budeme posuzovat rychlost ohřátí kapaliny v závislosti na čase. Tato možnost však není příliš objektivní, protože ohřátí zásobníku teplé vody může být značně zdlouhavý proces, díky němuž vyjdou poměrně dlouhé časové konstanty a regulace by nebyla kvalitní. V reálném systému by také mohlo dojít k přehřátí solárních kolektorů a úniku kapaliny primárního okruhu. (Solární panel by měl velkou teplotu a velký tlak. Solární systém by se pak snažil snížit tlak odpouštěním kapaliny přes pojišťovací ventil.) Tímto se nabízí i druhá možnost a to zjištění přechodové charakteristiky systému v závislosti na chlazení solárního panelu. Tato možnost je vhodná i pro budoucí plánované vytvoření samo nastavitelného systému. V režimu nastavení nechá regulátor nahřát solární panel na určitou vysokou teplotou a poté zapne čerpadlo na 50% svého výkonu do doby, než dojde ke snížení teploty kolektoru o stanovenou mez. Na základě zjištěných výsledků nastaví parametry PSD.

Stejná metoda byla použita i pro zjištění přechodové charakteristiky modelové soustavy. Solární kolektor byl nahřán na teplotu 50°C a nechán ochladit na stejnou teplotu, která je v zásobníku TUV. Výsledná přechodová charakteristika je ukázána na obrázku 14.1.



Obrázek 14.1 Přechodová charakteristika soustavy

Z výsledné přechodové charakteristiky je nutné odečíst dobu průtahu T_u =10s a dobu náběhu T_n = 180 s. Z nich vypočítáme pomocí vtahů (14.1) kritické zesílení a (14.2) kritickou periodu.

$$K_{krit} \cong \frac{\pi}{2}\frac{T_n}{T_u} = 15.1 \tag{14.1}$$

$$T_{krit} \cong 4 * T_u = 40 \tag{14.2}$$

Tabulka 14.1 Vzorce pro návrh parametrů metodou Ziegler-Nicholse

Typ regulátoru	r_0	T_I	T_D
P	0.5 K_{krit}	-	-
PI	0.45 K_{krit}	0.85 T_{krit}	-
PD	Doladí se na optimální hodnotu	-	0.12 T_{krit}
PID	0.6 K_{krit}	0.5T_{krit}	0.125 T_{krit}

Tyto kritické hodnoty jsou dosazeny do vzorečků v tabulce 14.1 a z nich jsou vypočítány parametry zvoleného regulátoru.

$$r_0 = 0{,}6K_{krit} = 0{,}6 * 15{,}1 = 9{,}06 \ ,$$

$$T_i = 0{,}5T_{krit} = 0{,}5 * 40 = 20 \ , \tag{14.3}$$

$$T_d = 0{,}125T_{krit} = 0{,}125 * 40 = 5 \ .$$

Tyto parametry je již možné zadat do regulátoru. Regulátor pomocí rovnice (4.14) vypočte konstanty v závislosti na periodě vzorkování. Pro periodu vzorkování 20 s dostáváme tyto velikosti konstant

$$\begin{aligned} q_0 &= r_0\left(1 + \frac{T}{T_i} + \frac{T_D}{T}\right) = 20{,}385 \ , \\ q_1 &= -r_0\left(1 + 2\frac{T_D}{T}\right) = -13{,}59 \ , \\ q_2 &= r_0\frac{T_D}{T} = 2{,}265. \end{aligned} \tag{14.4}$$

Pomocí Z-transformace (4.13) určíme již výsledný přenos PSD regulátoru jako

$$G_R(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = \frac{q_0 + q_1 z^{-1} + q_2 z^{-2}}{1 - z^{-1}} = \frac{20{,}385 - 13{,}59 z^{-1} + 2{,}265 z^{-2}}{1 - z^{-1}} \ . \tag{14.5}$$

14.2 Dynamické parametry regulované soustavy

Výsledný algoritmus regulátoru a jeho správné nastavení byly testovány na modelové soustavě regulátoru popsané výše. Při testování byly zkoumány především dva parametry soustavy.

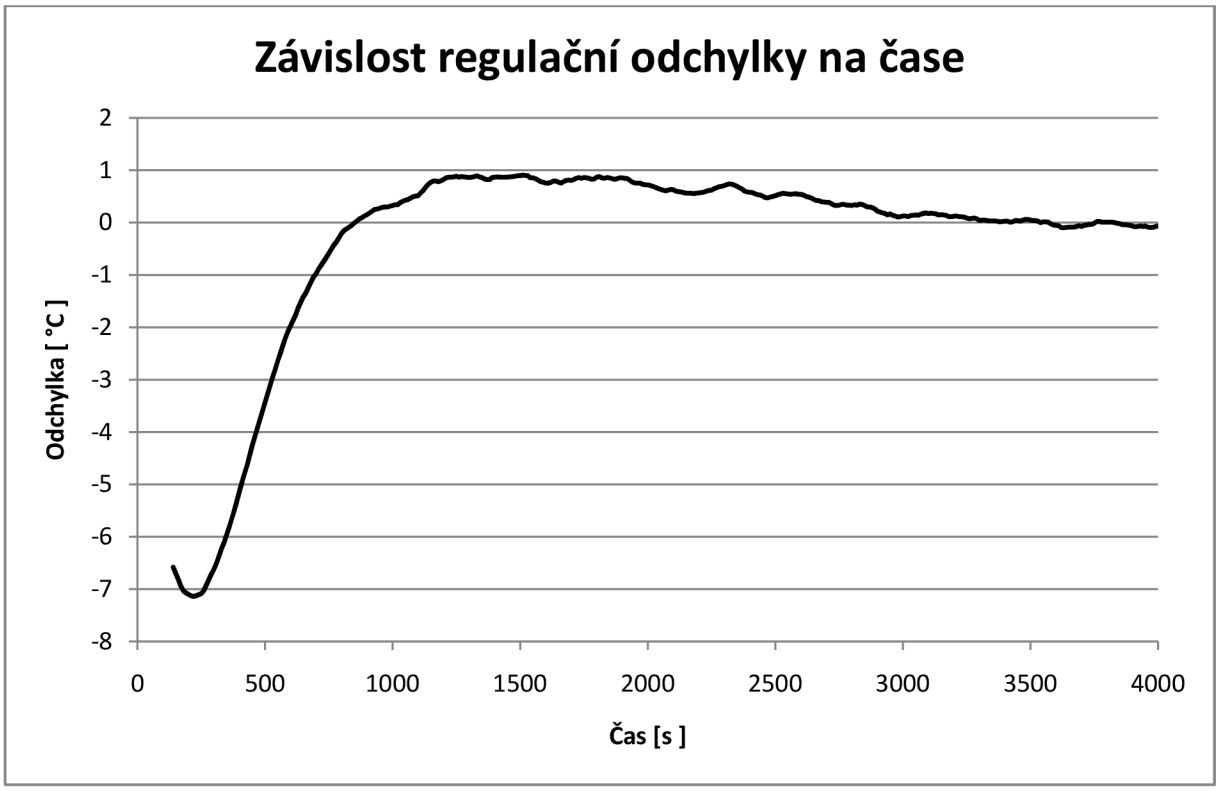
První z dynamických parametrů soustavy je odezva regulátoru na jednotkový skok. Pomocí odezvy na jednotkový skok sledujeme, zda systém, který vyvedeme z rovnovážného stavu vlivem působení poruch, nebo změnou hodnoty žádané veličiny se opět ustálí do původního stavu. Naměřené výsledky z průběhu testování jsou zobrazeny na následujícím obrázku 14.2.

Obrázek 14.2 Odezva soustavy na jednotkový skok

Jak je patrné z grafu, tak regulátor reaguje na prudkou změnu teploty velmi rychle. Teplota solárního panelu klesla o 36 °C za 4 minuty, což je vzhledem k soustavě a její možnosti předávání tepla z primárního okruhu do sekundárního velmi pozitivní výsledek.

O regulované soustavě je možné na základě změřených výsledků říct že je stabilní.

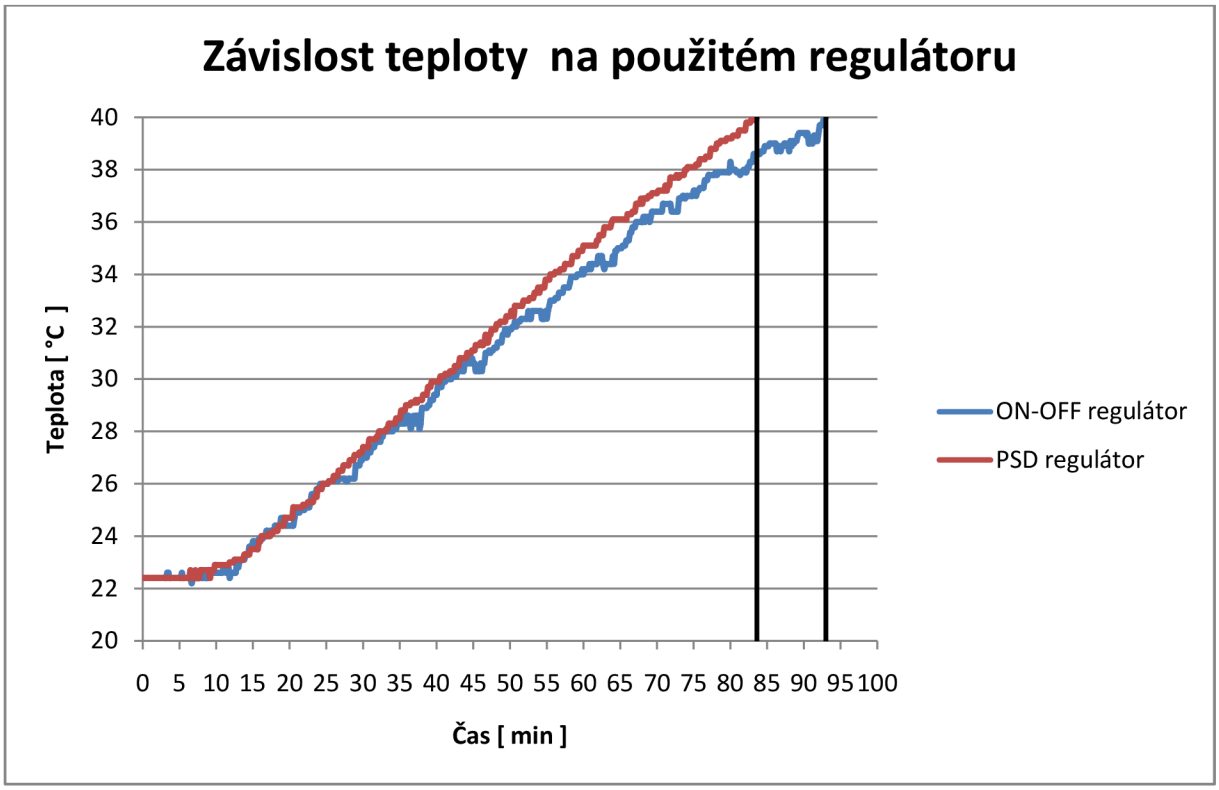
Druhý důležitý parametr soustavy je závislost regulační odchylky na čase. Tato závislost nám udává jakost regulačního pochodu a přesnost regulace. Jak je patrné z naměřených hodnot (obrázek 14.3) velikost regulační odchylky se nám po změně teploty velmi rychle ustálila v rozmezí teplot 0 až 1°C. Za delší časový úsek klesla na téměř nulovou hodnotu, kolem které se pohybuje. Na základě výsledků, můžeme tedy tvrdit, že přesnost regulace je vzhledem k druhu soustavy velmi kvalitní a přesná.



Obrázek 14.3 Závislost regulační odchylky na čase

14.3 Porovnání regulátorů

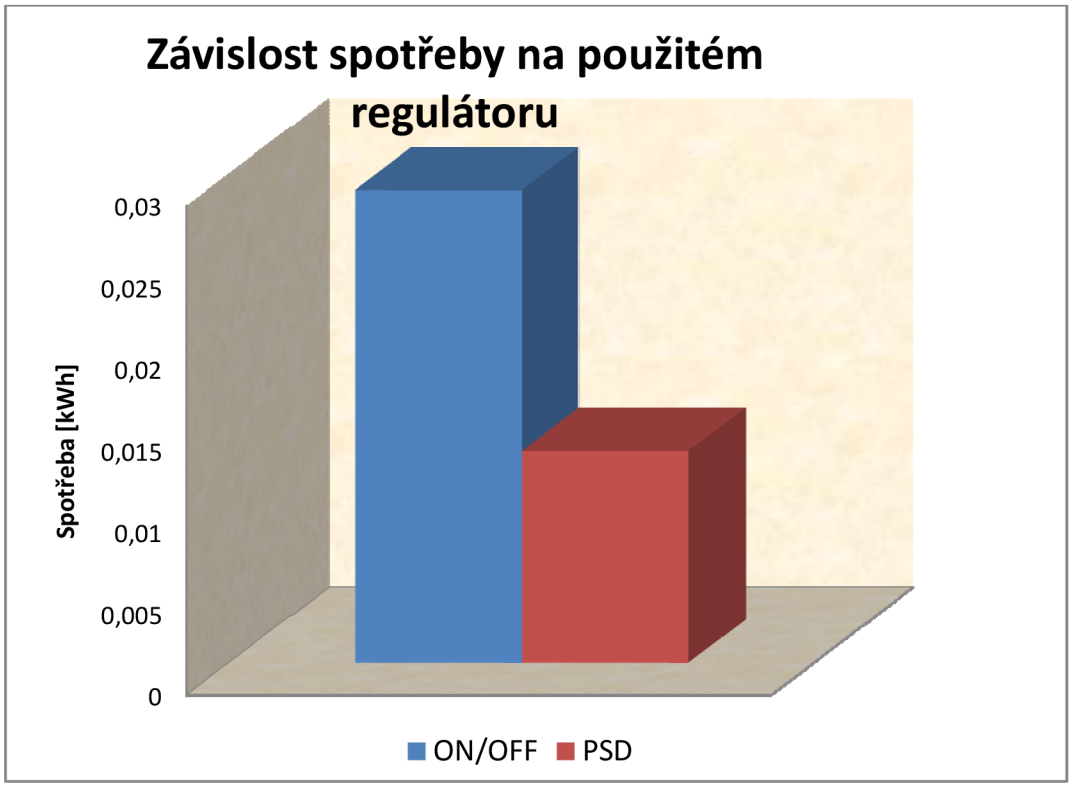
V průběhu testování byl regulátor PSD porovnáván s velmi často používaným diferenčním regulátorem typu ON/OFF. Pro oba regulátory byly nastaveny shodné podmínky simulace. V průběhu měření byla zjišťována především rychlost ohřevu zásobníku vody, z které vyplívá i kvality regulace. Výsledky měření jsou ukázány na obrázku 14.4.



Obrázek 14.4 Závislost teploty na použitém typu regulátoru

Z naměřených výsledků je zřejmé, že při použití kvalitnějšího regulátoru se zvýší rychlost ohřevu vody zásobníku a zkvalitní se využití sluneční energie.

V průběhu porovnávání regulátorů byla také měřena velikost spotřeby elektrické energie čerpadla. Při použití vytvořeného PSD regulátoru klesla spotřeba elektrické energie o víc než polovinu oproti regulátoru typu ON/OFF. Díky značnému snížení spotřeby se nám přiblížila možnost napájet regulátor a čerpadlo za pomoci fotovoltaického panelu a vytvoření nezávislé a beznákladové regulace využívající pouze sluneční záření. Porovnání spotřeby elektrické energie je ukázáno na obrázku 14.5.



Obrázek 14.5 Závislost spotřeby elektrické energie na použitém regulátoru

15 ZÁVĚR

Práce se zabývá regulací solárního systému pro ohřev teplé užitkové vody. Je zde přehledově popsán solární systém a jeho základní prvky. Větší část práce se zabývá regulací a to jak spojitou, tak i diskrétní. Matematicky jsem popsal jednotlivé typy základních regulátorů spojitých i diskrétních a jejich vlastnosti. Jelikož teorie regulace daleko přesahuje rámec mé práce, je zde popsána pouze malá část teorie o regulaci a regulátorech potřebná pro návrh regulátoru v solárním systému, přesto jsem se snažil řadit vše tak, aby i laik pochopil základní teorémy regulace a důvod výběru navrhovaného typu regulátoru.

Na základě teoretických poznatků jsem navrhnul blokové schéma regulátoru. Regulátor je diskrétní typu PSD. Jako řídící prvek je zde použit 8bitový mikroprocesor firmy Atmel. V textu je dále popsán návrh jednotlivých bloků regulátoru a jejich schematické zapojení. Konstrukci regulátoru se věnuje celá jedna kapitola. Jsou zde zobrazeny navržené desky plošných spojů, popsán důvod návrhu rozměrů a způsob konstrukce celkového regulátoru. V přílohách jsou přiloženy okótované rozměry použité konstrukční krabičky a rozměry mechanického zpracování.

Jelikož je regulátor diskrétního typu, je v práci popsán způsob návrhu řídícího algoritmu, blokové schéma programu a použité knihovny. Ovládací program mikroprocesoru obsahuje víc jak 1500 řádků textu a zaplňuje tak celou programovou paměť mikroprocesoru.

Pro komunikaci regulátoru s uživatelem byla zvolena bezdrátová technologie WiFi, která je řešená pomocí přídavného modulu. Návrh a zapojení komunikační modulu je opět popsán v textu práce. Pro komunikaci pomocí bezdrátové technologie WiFi byl vytvořen dvoustránkový webový server. Pomocí serveru je možné si zobrazovat aktuální nastavenou teplotu, ale i měnit parametry regulátoru z pohodlí domova.

Pro možnost testování regulátoru v reálném systému byl vytvořen model solárního systému s možností simulace slunečního záření pomocí zabudované topné spirály, pro jejíž řízení byl navrhnut druhý regulátor. Fotodokumentace navrženého modelu je opět přiložena v příloze.

V rámci diplomové práce byl tedy kompletně navržen regulátor pro regulaci solárního systém TUV. Pro ovládání regulátoru byla zvolena bezdrátová technologie WiFi a navržen ovládací „program“. Simulace a nastavení regulátoru probíhalo na vyrobeném modelu solárního systému TUV. Všechny cíle a podmínky návrhu byly splněny.

Regulátor bude ještě v budoucnu rozšířen o možnost automatického nastavení v závislosti na soustavě. Webový server bych také rád rozšířil o možnost statistického a grafického zobrazení průběhů neměřených teplot. Pro možnost levné komunikace bude vytvořen ovládací program, který bude komunikovat s regulátorem pomocí sběrnice RS-232.

LITERATURA

[1] THEMESSL, A., WEISS, W. *Solární systémy*. 1.vyd. Praha: Grada, 2005. 120 s. ISBN 80-247-0589-3

[2] ŠVARC, I., ŠEDA, M., VÍTEČKOVÁ, M. *Automatické řízení*. 1.vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007. 324 s. ISBN 978-80-214-3491-2

[3] VORÁČEK, R. *Automatizace a automatizační technika.II, Automatické řízení.* 1 .vyd. Brno : CP Books, 2005. 218 s. ISBN 80-251-0796-5

[4] BALÁTĚ, J. *Automatické řízení*. 1. vyd. Praha: BEN – Technická literatura, 2003. 664 s. ISBN 80-7300-020-2.

[5] ASTRÖM, J., HÄGGLUND, T. *PID Controllers: Theory, Design and Tuning*. Second Edition. Research Triangle Park – North Carolina, Instrument Society of America, 1995

[6] KLÁN, P. *Moderní metody nastavení PID regulátorů.* Automa, 2000, roč. 6, č. 9, s54-57. ISSN 1210-9592.

[7] KLÁN, P. *Metody zlepšení PI regulace*. Automa, 2001, roč. 7, č. 12, s 4-10. ISSN 1210-9592.

[8] ATmega16. Katalogový list obvodu ATmega16 [Online]. Dostupný na www: http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/8154S.pdf (prosinec 2009).

[9] MATOUŠEK,D. *Práce s mikrokontroléry ATMEL AVR-ATmega16*. 1. vyd. Praha: BEN – Technická literatura, 2006. 322 s. ISBN 80-7300-174-8.

[10] KREIDL,M. *Měření teploty –senzory a měřicí obvody*. 1. vyd. Praha: BEN-Technická literatura, 2005. 230 s. ISBN 80-7300-145-4.

[11] LCD MC0802A. Katalogový list LCD displeje MC0802A [Online]. Dostupný na www: http://akcie.gme.sk/_dokumentace/dokumenty/513/513-122/dsh.513-122.1.pdf (prosinec 2009).

[12] PCF8583. Katalogový list obvodu reálného času PCF 8583 firmy NXP [Online]. Dostupný na www: http://www.nxp.com/documents/data_sheet/PCF8583.pdf (prosinec 2009).

[13] Connect One. Výrobce komunikačních modulů WiFi. [Online]. Dostupný na www: http://www.connectone.com (prosinec 2009).

[14] Spezial electronic. Český dodavatel modulů WiFi. [Online]. Dostupný na www: http://www.spezial.cz (prosinec 2009).

[15] SolarKolektor. Dodavatel panelů solárních kolektorů [Online]. Dostupný na www: http://www.solarkolektor.cz (prosinec 2009).

SEZNAM ZKRATEK

P	Proporcionální
I	Integrační
D	Derivační
PID	Proporcionálně Integračně Derivační
PSD	Proporcionálně Sumačně Diferenční
PP	Pásmo Proporcionality
PWM	Pulsně Šířková Modulace
T	Vzorkovací Perioda
LCD	Liquid Crystal Display
DIF	Diference
RTC	Obvod Reálného Času
TUV	Tepelně Užitková Voda
SPI	Sériové Programování
MOSI	Master Output Slave Input
MISO	Master Input Slave Output
SCL	Serial Clock
SDA	Serial Data
DPS	Desky Plošných Spojů
MaR	Měření a Regulace

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA 1 : Schéma zapojení regulátoru

PŘÍLOHA 2: Výkres krabičky U-KPDIN3

PŘÍLOHA 3: Mechanické opracování krabičky regulátoru

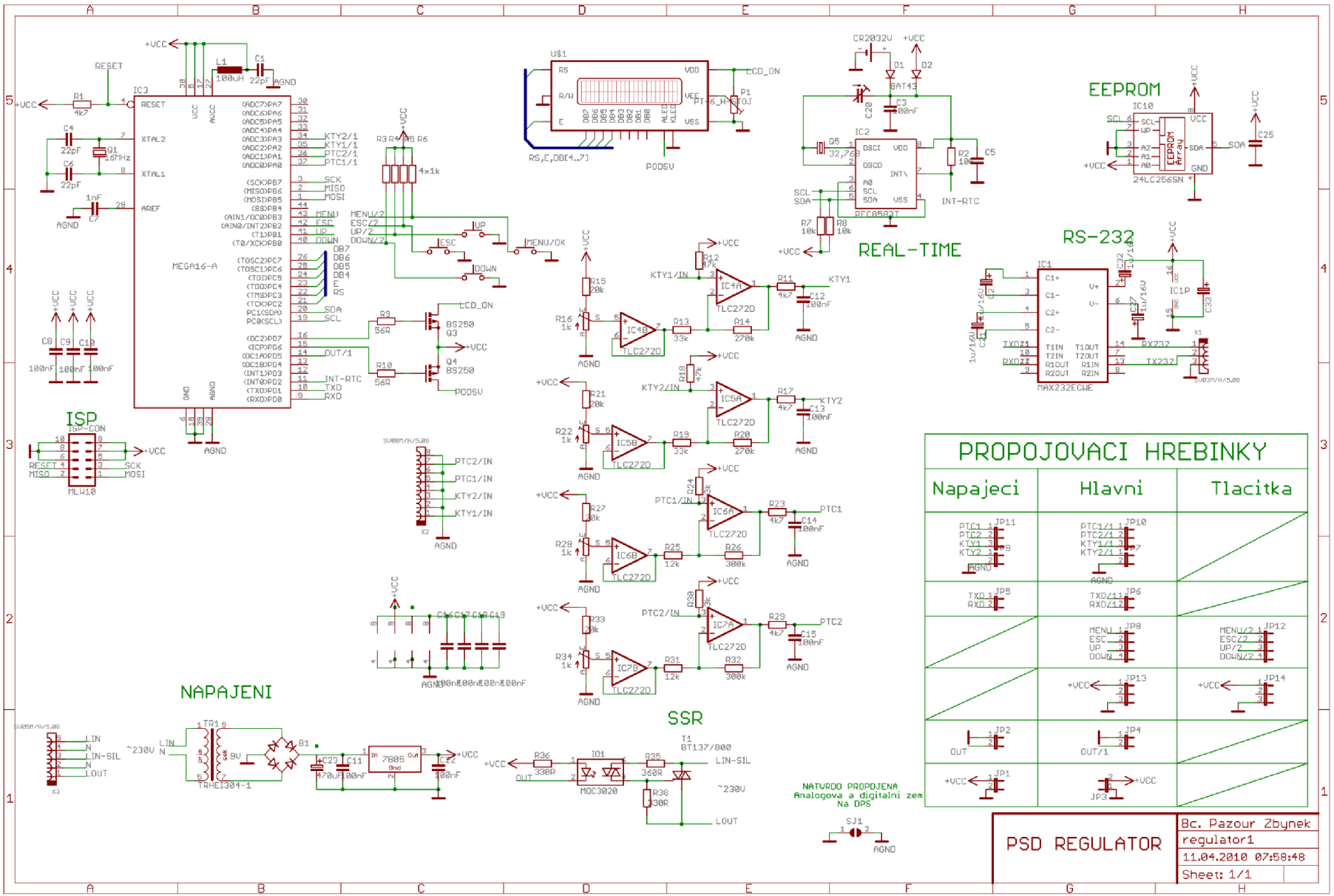
PŘÍLOHA 4: Popis krabičky regulátoru

PŘÍLOHA 5: Celkový seznam součástek regulátoru

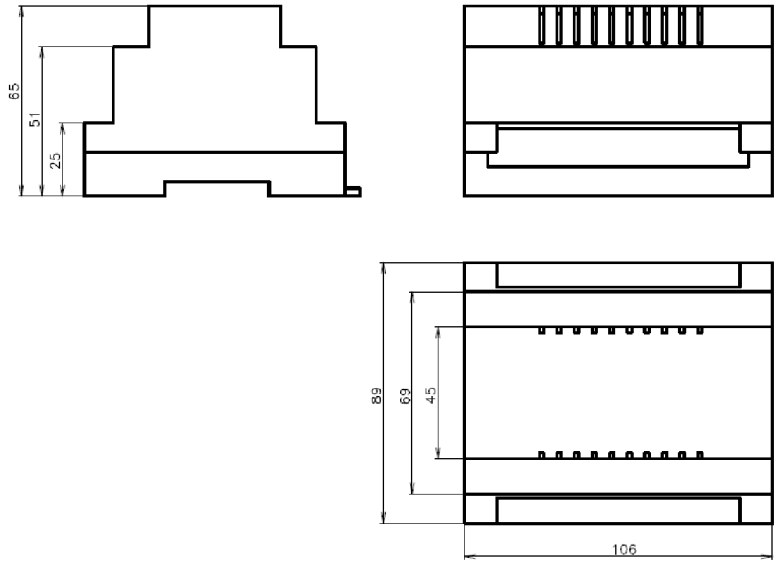
PŘÍLOHA 6: Uživatelský manuál regulátoru

PŘÍLOHA 7: Fotky modelu soustavy se slunečními kolektory

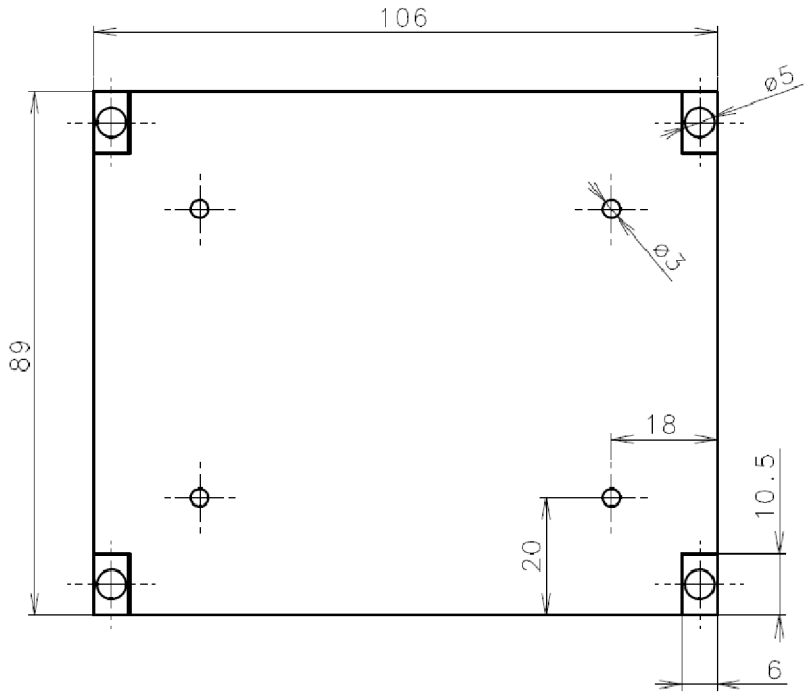
PŘÍLOHA 1


MEGA16-A
ISP
ISP-CON
MLW10
REAL-TIME
PCF8583T
CR2032V
BAT43
EEPROM
24LC256SN
RS-232
MAX232ECWE
NAPAJENI
SSR
BT137/800
MOC3020
TRHEI304-1
7805
PROPOJOVACI HREBINKY
Napajeci
Hlavni
Tlacitka
NATURDO PROPOJENA
Analogova a digitalni zem
Na DPS
PSD REGULATOR
Bc. Pazour Zbynek
regulator1
11.04.2010 07:58:48
Sheet: 1/1

PŘÍLOHA 2

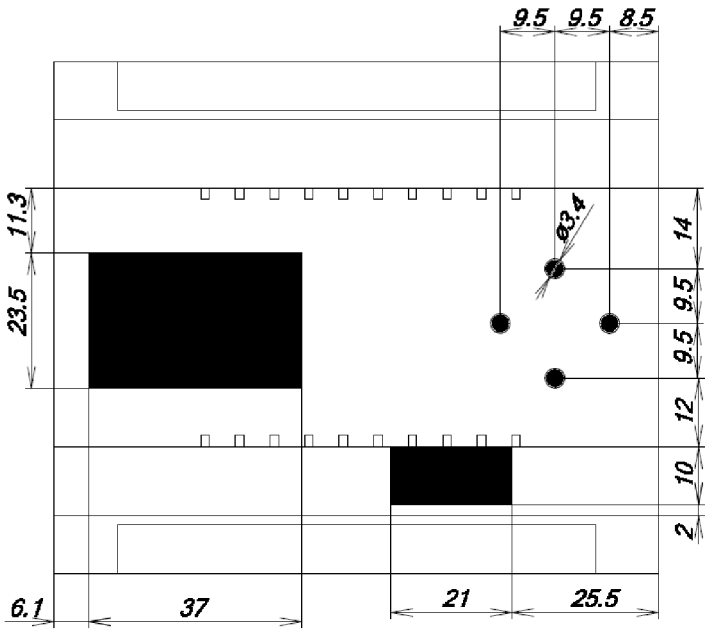


MATERIÁL: .				KRESLIL: Zbyněk Pazour	UVOLNIL PRO:
POLOTOVAR: .				KONTROLOVAL:	
POZICE: 1	MĚŘÍTKO: 1 : 2	HMOTNOST V KG:	KUSU: 1	DATUM: .	
				Č.SESTAVY: .	
BETA CONTROL S.R.O.	NÁZEV: .			ČÍSLO VÝKRESU: .	VERZE: V0
				POČET LISTŮ: 1	LIST: 1



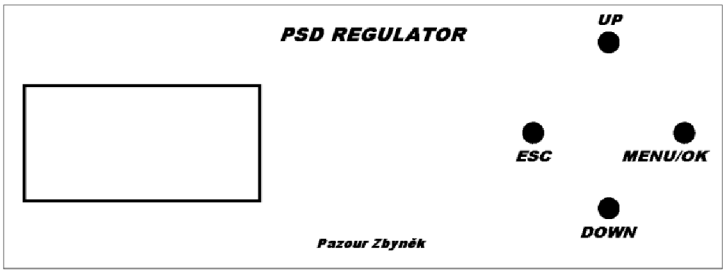
MATERIÁL: .				KRESLIL: Zbyněk Pazour	UVOLNIL PRO:
POLOTOVAR: .				KONTROLOVAL:	
POZICE: 1	MĚŘÍTKO: 1 : 1	HMOTNOST V KG:	KUSU: 1	DATUM: .	
				Č.SESTAVY: .	
BETA CONTROL S.R.O.	NÁZEV: .			ČÍSLO VÝKRESU: .	VERZE: V0
				POČET LISTŮ: 1	LIST: 1

PŘÍLOHA 3



MATERIÁL: .				KRESLIL: Zbyněk Pazour	UVOLNIL PRO:
POLOTOVAR: .				KONTROLOVAL:	
POZICE: 1	MĚŘÍTKO:	HMOTNOST V KG:	KUSU: 1	DATUM: .	
				Č.SESTAVY: .	
BETA CONTROL S.R.O.	NÁZEV: .			ČÍSLO VÝKRESU: .	VERZE: V0
				POČET LISTŮ: 1	LIST: 1

PŘÍLOHA 4



PŘÍLOHA 5

Označení	Hodnota	Popis	Pouzdro	Počet
Rezistory				
R9,10	56R	Rezistor	0805	2
R36,38	330R	Rezistor	0805	2
R35	360R	Rezistor	0805	1
R3,4,5,6	1k	Rezistor	0805	4
R24,30	3k	Rezistor	0805	2
R1,11,17,23,29	4K7	Rezistor	0805	5
R7,8	10k	Rezistor	0805	2
R25,31	12k	Rezistor	0805	2
R13,19	33k	Rezistor	0805	2
R2,12,18	47k	Rezistor	0805	2
R14,20	270K	Rezistor	0805	2
R26,32	300k	Rezistor	0805	2
R16,22,28,34	1K	Trimr-víceotáčkový	64Y	4
P1	1k	Trimr stojatý 10mm		1
Kondenzátory				
C1,4,6	22pF	Keramický kondenzátor	0805	3
C7	1nF	Keramický kondenzátor	0805	1
C3,5,8,9,10,25,	100nF	Keramický kondenzátor	0805	6
C 11-19,22	100nF	Keramický kondenzátor	0805	10
C2,C21,C27,C32,C33	1uF/16V	Elektrolytický kondenzátor	RM 2,5	5
C23	470uF/50V	Elektrolytický kondenzátor	RM 2,5	1
C20	5-35pF	Laditelný kondenzátor		1
Integrované obvody				
IO1	MOC3040	Optotriak	DIL6	1
IC1	MAX232ECWE		SO16	1
IC2	PCF8583	Obvod RTC	SO8	1
IC3	ATmega16	Mikroprocesor	TQF44	1
IC4,5,6,7	TLC272		SO8	4
IC10	24LC256SN	Paměť EEPROM	SOIC8	1
7805	7805	Lineární stabilizátor	TO-220	1

Označení	Hodnota	Popis	Pouzdro	Počet
Ostatní				
B1	B40S	Usměrňovací můstek	MiniDIL	1
T1	BT 137/800	Triak	TO-220	1
TR1	TRHEI304-1X9	Transformátor 1x9V		1
X1	SV03M/5,08	Násuvná svorkovnice 90°		1
X2	SV05M/5,08	Násuvná svorkovnice 90°		1
X3	SV08M/5,08	Násuvná svorkovnice 90°		1
D1,2	BAT43	Dioda	SOD80	2
L1	100uH	Tlumivka	TL.SMT54	1
Q1	16MHz	Krystal RTC		1
Q5	32,768kHz	Krystal RTC		1
Q3,Q4	BS250	tranzistor		2
G1	CR2032	Záložní baterie RTC		1
U$1	DMC 2x8	LCD display 2x8 znaků		1
ISP-CO	MLW10	Programovací konektor	MLW-10G	1
UP,DOWN, MENU, ESC	P-B1720	Mikrotlačítko		4
Spojovací a konstrukční materiál				
JP1,2,5,8,11,13	BL820G	Dutinková lišta		1
JP3,4,6,10	ASS12030G	Konektorové kolíky lámací 30mm		1
JP12,14	S1G20	Konektorové kolíky lámací 10 mm		1
DA5MX30		Distanční sloupek kovový 30mm		4
KDA6MX10		Plastový distanční sloupek 10mm		8
SKM3X6		Šroub M3 s půlkulatou hlavou délky 6mm		8
U-KPDIN3		Plastová krabička 6ti modulová na DIN		1

PŘÍLOHA 6

Víceparametrový PID regulátor

(Nastavení)

Pro nastavení regulátoru slouží zabudovaná nabídka, jenž se spouští tlačítkem MENU. Pro pohyb v menu se využívá čtyř tlačítek:

- MENU/OK - zobrazení menu, potvrzení volby
- ESC - návrat do nadřazené složky, ukončení menu
- UP - pohyb v nabídce směrem vzhůru
- DOWN - pohyb v nabídce směrem dolů

Uspořádání programové nabídky je zobrazeno na následující stránce. Zelené označení značí nadřazenou listovací nabídku, modré poslední volitelnou nabídku. Vysvětlení jednotlivých položek je v následujícím textu.

ZOBRAZ: Volba zobrazení na displeji v průběhu regulace. Úsporný režim vypne displej a v průběhu regulace se nám nic nezobrazuje.

NASTAV: Nabídka nastavení regulátoru

CAS & DAT.: Nastavení aktuálního času ve tvaru hh:mm:ss a data ve tvaru dd.mm.rr

PAR.PID: Nastavení parametrů PID regulátoru:

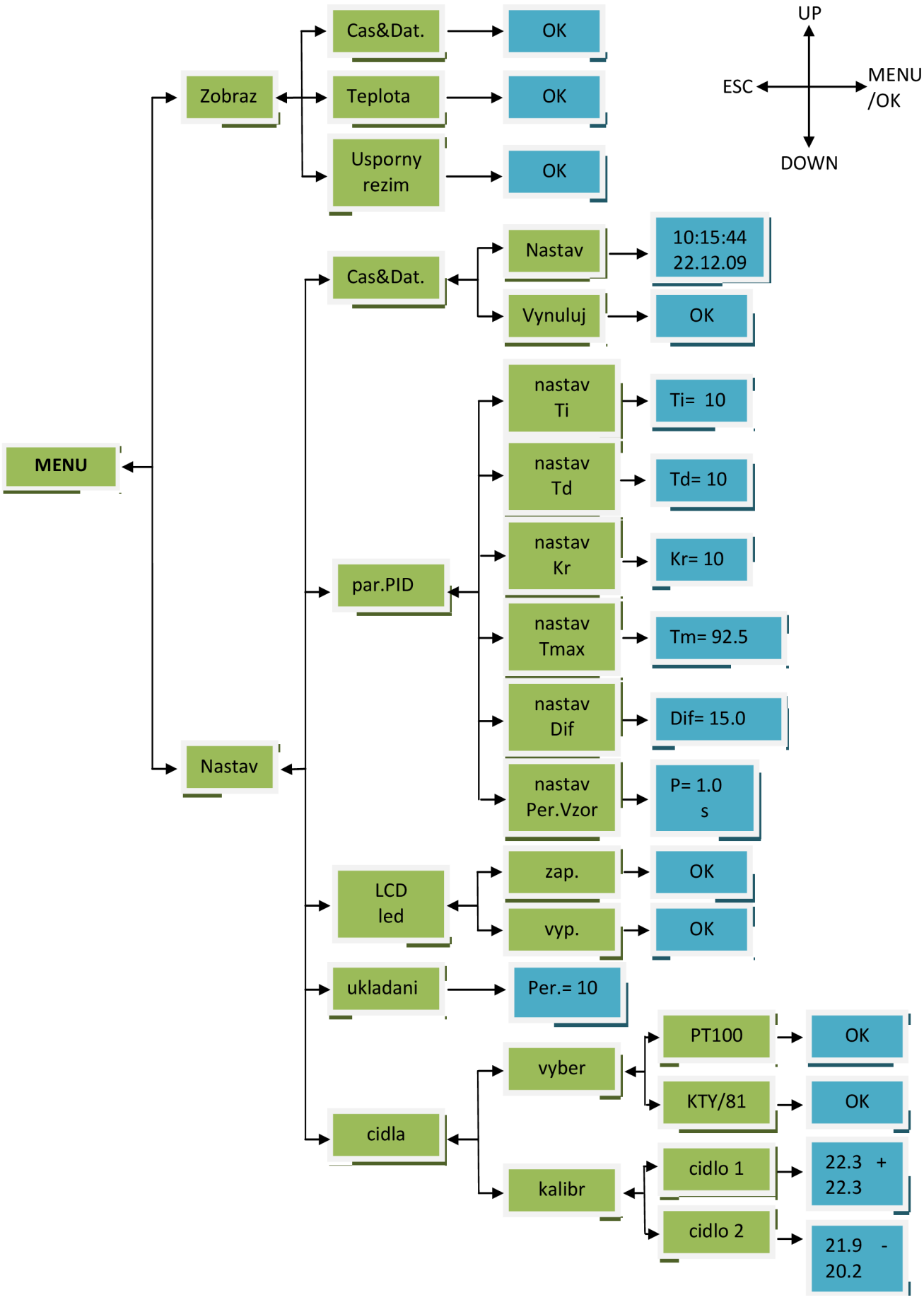
- Ti – integrační konstanta v rozsahu 0 – 9999 sekund
- Td – derivační konstanta v rozsahu 0 – 9999 sekund
- Kr - zesílení v rozsahu 0 – 999
- Tm – maximální teplota výměníku v rozsahu 0 – 99 °C
- Dif – volitelný rozdíl teplot v rozsahu 0 – 99 °C
- P – perioda vzorkování teplot v rozsahu 10 – 1000 s

LCD LED: Možnost zapnout, nebo vypnout podsvícení displeje

UKLADANI: Nastavení periody ukládáni teplot v rozsahu 1 – 99 minut

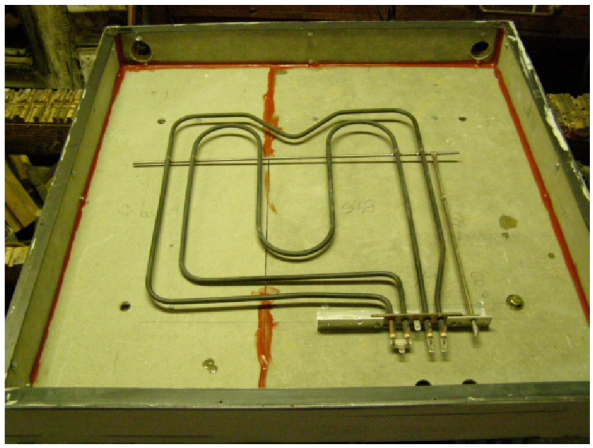
CIDLA – VYBER : Volba použitých čidel PT100 / KTY81-210

- KALIBRACE : Možnost eliminovat odpor přívodních vodičů. V horním řádku se zobrazuje kalibrované čidlo a v dolním druhé použité čidlo pro možnost kontroly. Kladná kalibrace je znázorněna znakem +, záporná znakem -, nulová kalibrace znakem 0.

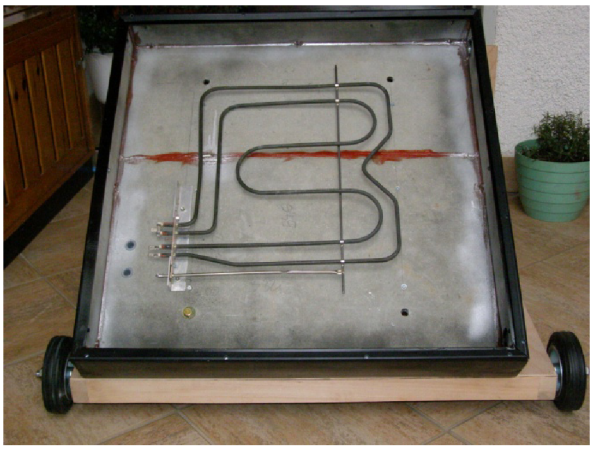

UP
ESC
MENU
/OK
DOWN
MENU
Zobraz
Cas&Dat.
OK
Teplota
OK
Usporny
rezim
OK
Nastav
Cas&Dat.
Nastav
10:15:44
22.12.09
Vynuluj
OK
par.PID
nastav
Ti
Ti= 10
nastav
Td
Td= 10
nastav
Kr
Kr= 10
nastav
Tmax
Tm= 92.5
nastav
Dif
Dif= 15.0
nastav
Per.Vzor
P= 1.0
s
LCD
led
zap.
OK
vyp.
OK
ukladani
Per.= 10
cidla
vyber
PT100
OK
KTY/81
OK
kalibr
cidlo 1
22.3 +
22.3
cidlo 2
21.9 -
20.2

PŘÍLOHA 7

Fotka 1: Příprava rámu pro sluneční kolektor



Fotka 2: Zabudované topné těleso



Fotka 3,4 : Namontovaný rám solárního kolektoru

Fotka 5 : Zapojený solární panel

Fotka 6 : Zásobník TUV

Fotka 7 : Hotová modelová soustava

Fotka 8 : Rozvaděč MaR